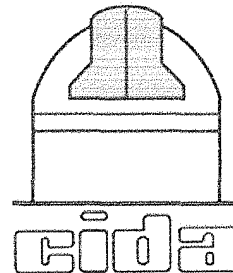




UNIVERSIDAD
DE LOS ANDES



**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN GRUPO CORRECTOR DE
FOCO PRIMARIO PARA EL TELESCOPIO REFLECTOR DE
1m DEL OAN**

Autor: Lic. Maria Gracia Batista Rojas **Tutor:** Lic. Franco Della Prugna
(CIDA)

www.bdigital.ula.ve

Tesis de Maestría

FACULTAD DE CIENCIAS
POSGRADO EN FÍSICA FUNDAMENTAL

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

Mérida, Octubre 2014

Dedicatoria

www.bdigital.ula.ve

Papá, Mamá, Hernán, Luis, Daniel, Alfredo y abuela Martha, mis mayores motivos de inspiración para dar lo mejor de mí. Les dedico éste y todos los éxitos que alcance... espero poder enorgullecerlos.

Agradecimientos

Primeramente a Dios, por haberme dado vida, la oportunidad de hacer lo que me llena y por todas las bendiciones que diariamente me regala.

A mis padres, Hernán y Eunice, por su constante, invaluable e incondicional amor y apoyo en cada etapa de este proyecto. Siempre he recibido lo mejor de su parte, no merecen otra cosa que recibir lo mejor. No me alcanzará la vida para retribuir todo lo hacen por mí.

A mis hermanos Hernán y Luis, ambos ejemplos de excelencia, perseverancia y profesionalismo. Dios no pudo darme mejores ejemplos a seguir, mejores hermanos para crecer. Daniel, tu memoria es inspiración para no rendirme, impulso para seguir.

A mi querido Alfredo, por su incalculable apoyo y paciencia en todo momento. Por alentarme a esforzarme cada día y a no rendirme. Agradezco a la vida cada momento compartido a su lado.

A la Fundación CIDA, por el respaldo económico y académico para poder realizar mi maestría. A todos sus investigadores y técnicos, ejemplos de excelencia, compromiso y verdadera vocación por su trabajo. Un especial agradecimiento a Juan Downes, Cecilia Mateu, Fabiola Hernández, Kathy Vieira, Gladis Magris, César Briceño y Jesús Hernández por su ayuda cuando los necesité.

A mis compañeros del CIDA, que se convirtieron en lo más cercano a una familia en Mérida y fueron soporte para sobrellevar todos los altibajos en el proceso. Son parte importante de mi vida.

Al Instituto de Astronomía de la UNAM, por haberme dado la oportunidad de hacer la estadía académica en su sede. En especial al doctor Alejandro Farah quien me ayudó antes y durante la estancia con la mejor disposición e hizo posible el intercambio. Al doctor Salvador Cuevas por su valioso tiempo concedido e invaluable conocimiento compartido. Igualmente, un especial agradecimiento a la familia Farah por abrirme las puertas de su casa y darme todo el respaldo que necesité y el cariño que no esperé. Nunca podré olvidar todo lo que hicieron por mí.

Por último, pero con un especial énfasis, quisiera agradecer a Franco Della Prugna por haber sido aparte de un gran tutor académico, un verdadero amigo. Gracias por compartir conmigo parte de ese invaluable conocimiento y experiencia, por los consejos y direcciones, por la paciencia, el optimismo y por haber creído en mí. Espero algún día poder ser espejo de tu excelencia.

www.bdigital.ula.ve

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema y justificación científica	2
1.1.1. Proyectos potenciales con un nuevo corrector de foco primario	2
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
1.3. Especificaciones y requerimientos	5
1.3.1. Configuración original del telescopio	5
1.3.2. Rango espectral	5
1.3.3. Distancia focal	5
1.3.4. Escala	6
1.3.5. Eficiencia del sistema	6
1.3.6. Resolución final	6
1.3.7. Requerimientos ambientales de diseño, operación y su- pervivencia	6
1.3.8. Muestreo de resolución espacial	6
1.3.9. Dimensiones límites	6
1.3.10. Modos de operación	7
1.4. Antecedentes	7
2. Marco teórico	13
2.1. Aberraciones ópticas	13
2.1.1. Aberración esférica	14
2.1.2. Coma	15
2.1.3. Astigmatismo	16
2.1.4. Aberración cromática	17
2.1.5. Curvatura de campo	18
2.1.6. Distorsión	19
2.1.7. Teoría de aproximación del tercer orden de Seidel	20
2.2. Superficies ópticas	21
2.2.1. Esféricos convencionales y “Lens bending”	21

2.2.2. Espejos cónicos	22
2.2.3. Asféricos	24
2.3. Sistemas correctivos	25
2.3.1. Sistemas refractivos	25
2.3.2. Sistemas reflectivos	28
2.3.3. Sistemas híbridos	29
3. Metodología	32
3.1. Definición del diseño óptico	33
3.2. Análisis multivariable	39
3.3. Análisis iterativo	41
4. Resultados	48
4.1. Relación entre los sistemas obtenidos del análisis multivariable y la Simulación Numérica Rigurosa	48
4.2. Selección del sistema definitivo	53
4.2.1. Análisis del desempeño óptico de los sistemas	53
4.2.2. Análisis sobre el cumplimiento de las especificaciones y los requerimientos	55
4.2.3. Análisis sobre la factibilidad de construcción de los sis- temas	57
4.2.4. Selección del sistema solución	57
5. Conclusiones	67
Referencias	71
A. Prescripción del grupo óptico CorCat	73

1

Introducción

El Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICIT), en 1973 elaboró un programa para la creación de un instituto autónomo que se dedicara a la investigación en astronomía. En 1975, por decreto presidencial, se estableció la Fundación Centro de Investigaciones de Astronomía (CIDA). Desde su fundación hasta la fecha, el CIDA ha representado un pilar fundamental en materia de investigación científica en el país, realizando y promoviendo las investigaciones en astronomía y disciplinas afines. Entre sus principales responsabilidades están las de administrar, operar y mantener los equipos e instrumentos astronómicos del Observatorio Nacional de Llano del Hato (OAN).

El Departamento de Tecnología e Innovación del Centro de Investigaciones de Astronomía, en su plan de incrementar y fortalecer el desarrollo tecnológico de la institución, ha ido creando una base de conocimiento y experticia tecnológica a lo largo de los años, mediante su participación y liderazgo en la modernización de los telescopios del OAN. Tal es el caso de la instalación de la Cámara CCD de Mosaico en el Telescopio J. Stock en 1997-98, y el proyecto de mejoras y actualización de la misma, actualmente en curso, o la computarización de los movimientos del Telescopio Reflector y su domo. En tal sentido, lograr que el diseño de un corrector óptico de foco primario, específicamente destinado a uno de los telescopios del OAN, sea factible de construir con esa infraestructura, ayudaría a auspiciar la autonomía tecnológica del departamento y por lo tanto del instituto.

En este documento se muestran los objetivos, especificaciones y requerimientos a cumplir en el diseño del corrector, así como la metodología seguida y los resultados obtenidos a partir de ella.

1.1. Planteamiento del problema y justificación científica

Dentro de esta dinámica de actualización y dotación de nuevas capacidades a los telescopios del OAN, el Departamento de Tecnología e Innovación del CIDA propuso modificar el sistema óptico del Telescopio Reflector de 1m con un corrector de foco primario para dotarlo de un foco $f/5$ que permitiera obtener imágenes aceptables sobre un campo de 19×19 arcmin, considerablemente mayor que el original de 4×4 arcmin que daba el foco $f/21$ para el cual fue diseñado originalmente este telescopio (Della Prugna & Schenner 2009). Sin embargo, y aunque el diseño y fabricación del adaptador $f/5$ inicial fue exitoso, tal que actualmente se encuentra en uso científico, pronto fue evidente que era importante contar con una versión mejorada capaz de proporcionar un campo mayor, del orden de 1×1 grados. El espejo primario de este telescopio es esférico, así que lograr este campo de visión representa un reto importante debido a que es el caso menos estudiado y más complejo dentro de la familia de espejos cónicos.

El incentivo principal de poder tener un campo de visión más amplio en el Telescopio Reflector de 1m del OAN, es poder incrementar sus capacidades en su configuración de foco primario ($f/5$). Además, lograr un campo más amplio de visión permitiría llevar a cabo, de una forma óptima y eficiente, diferentes tipos de observaciones astronómicas, tanto de índole astrofísica como astrométrica.

1.1.1. Proyectos potenciales con un nuevo corrector de foco primario

A continuación se mostrarán algunos proyectos científicos que servirán como ejemplo de observaciones que se podrán llevar a cabo con el nuevo corrector, debido a que requieren de un campo de visión más amplio del que se puede obtener actualmente en el Telescopio Reflector de 1m del OAN.

Búsqueda de planetas extrasolares en cúmulos jóvenes, a través del método de tránsitos

Con un campo de un grado cuadrado de amplitud se podrían observar simultáneamente miles de estrellas en cúmulos cercanos con edades de entre, aproximadamente 3 y 100 millones de años, para detectar las minúsculas variaciones de brillo atribuibles al tránsito de un planeta frente a una estrella. La probabilidad de observar un tránsito depende, entre otros factores, del número de estrellas que se observen; a mayor número de estrellas del cúmulo presentes dentro del campo visual del telescopio, mayor la probabilidad de captar un planeta en tránsito frente a una de ellas.

Sondeos a gran escala de estrellas jóvenes en regiones de formación estelar de la Vía Láctea

Muchas de las regiones de formación estelar o maternidades estelares que se encuentran más cerca de nosotros ocupan decenas de grados cuadrados en el cielo, lo que ha hecho tradicionalmente difícil explorar de manera sistemática y completa estas inmensas áreas del cielo.

Contar con un censo completo de estrellas jóvenes en regiones cercanas de formación estelar es fundamental para estudiar problemas astrofísicos primordiales como la eficiencia de formación de estrellas (cuánto gas se transforma en ellas), si la formación de estrellas ocurre generalmente de manera inducida y secuencial o es más bien estocástica, los procesos dinámicos que llevan a la disipación de cúmulos de estrellas, la forma de la función inicial de masa estelar, y la evolución de las propiedades de las estrellas y de los discos protoplanetarios en sus primeras etapas.

Recién con la llegada de detectores digitales de gran formato, unido a la disponibilidad de telescopios de tamaño modesto a grande (de 1m a ~ 4 m) dotados de amplios campos visuales bien corregidos, es que se ha iniciado la era de la exploración digital a gran escala del cielo. se pueden citar como ejemplos de tales estudios, los sondeos con la Cámara QUEST en el telescopio Stock del OAN, el estudio del halo de la Vía Láctea por Vivas et al. 2001 [22] y Vivas et al. 2004 [23]; el CVSO - CIDA Variability Survey of Orion de Briceno et al. 2001 [3], Briceno et al. 2005 [4] y Briceno et al. 2007 [5]; el survey de todo el cielo de 2MASS - Two Micron All Sky Survey de Skrutskie

et al. 2006 [20]; los estudios con el Sloan Digital Sky Survey - SDSS hechos por Abazajian et al. 2003 [1]; el United Kingdom Infrared Telescope Deep Sky Survey - UKIDSS de Lawrence et al. 2007 [12]; y ahora VISTA - 4m Visible-IR Telescope for Astronomy (<http://www.vista.ac.uk/>).

Monitoreo fotométrico a gran escala de estrellas jóvenes en regiones de formación estelar y cúmulos de la Vía Láctea

Monitorear las variaciones de brillo que muestra una estrella al rotar sobre su eje permite estudiar propiedades como su velocidad de rotación, cómo ésta depende de las condiciones iniciales en que se formó la estrella y su evolución ulterior de procesos como vientos estelares e interacción con compañeras cercanas en sistemas binarios.

Estudiar cómo esas variaciones dependen de la masa o la edad de la estrella requiere observar y comparar muchas estrellas monitoreadas de la misma manera. Es por ello que un campo visual grande es esencial para estudiar eficientemente muchas estrellas en sistemas como cúmulos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Diseñar y evaluar un corrector de foco primario para el Telescopio Reflector de 1m del OAN que logre un campo de un grado cuadrado.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Realizar propuestas de sistemas ópticos con base en lo que se conoce en la literatura especializada sin por eso descartar alternativas novedosas y viables.
2. Evaluar la bondad de las propuestas empleando la aproximación de tercer orden de Seidel, para poder seleccionar aquellas que pudieran potencialmente cumplir con las especificaciones y requerimientos del proyecto.
3. Simular rigurosamente con un software de diseño óptico las propuestas de los sistemas ópticos planteados.

4. Comparar los diseños ópticos propuestos entre sí con base en su desempeño óptico en las simulaciones numéricas y a su factibilidad de construcción.

1.3. Especificaciones y requerimientos

En esta sección se describirán los requerimientos y especificaciones que debe cumplir el corrector de campo para el Telescopio Reflector de 1m del OAN. Estos requerimientos y especificaciones son el producto de un consenso entre las capacidades tecnológicas de la institución y las necesidades científicas reflejadas en los objetivos a cumplir.

1.3.1. Configuración original del telescopio

Los elementos ópticos que componen originalmente al Telescopio Reflector de 1m del OAN no pueden ser modificados, ya que se perdería la posibilidad de operar en su configuración original $f/21$.

1.3.2. Rango espectral

El corrector de campo debe optimizarse para el rango espectral de 350 - 1000 nm.

1.3.3. Distancia focal

El Telescopio Reflector de 1m del OAN tiene la opción de operar en la configuración $f/21$, usando el espejo secundario y un grupo corrector óptico integrado, y en la configuración $f/5$ cuando sólo se usa el espejo esférico primario. Sin embargo, con esta última configuración el telescopio por sí mismo no proporciona imágenes con calidad aceptable y es por esto que se requiere de un sistema óptico correctivo adicional. El corrector de foco primario debe ser afocal. Si la distancia focal final disminuyera, el camino óptico sería menor y las aberraciones se volverían considerablemente más difíciles de corregir, mientras que si aumentara, el campo con el grado cuadrado ya no estaría cubierto por un solo CCD de 9×9 cm, en la actualidad de los mayores disponibles.

1.3.4. Escala

En la configuración $f/5$, con una apertura de 1m de diámetro y empleando un grupo corrector óptico afocal, la escala del telescopio es de 41,3 "/mm.

1.3.5. Eficiencia del sistema

La eficiencia cuántica mínima del corrector de foco primario, en el rango espectral descrito anteriormente, debe alcanzar por lo menos un 80 %.

1.3.6. Resolución final

El corrector de foco primario deberá lograr que el 80 % de la energía de una imagen estelar esté contenida en 1 x 1 segundo de arco en todo el campo útil a 550nm.

1.3.7. Requerimientos ambientales de diseño, operación y supervivencia

Optimización: a $T=2^{\circ}\text{C}$ y $P=490$ mmHg (Temperatura y presión atmosférica en el OAN, Venezuela). Rango mínimo de operación: Temperatura: -8°C a 20°C , Presión: 480 a 500mmHg.

1.3.8. Muestreo de resolución espacial

El elemento de resolución causado por turbulencia atmosférica (FWHM), deberá ser muestreado con al menos 2 x 2 píxeles para cumplir con el criterio de Nyquist.

1.3.9. Dimensiones límites

En caso de requerir colocar el sistema óptico del corrector de foco primario parcial o totalmente fuera del tubo del telescopio, la longitud del soporte (incluyendo la cámara) no debe ser mayor a 1.3m para evitar colisiones con la estructura interna de la cúpula.

El sistema optomecánico debe tener una disposición y dimensiones tales que

no obstruyan más del 16 % de la luz que incide en el espejo primario (Diámetro máximo de la obstrucción de 40cm aproximadamente), de manera que la pérdida en magnitud sea menor que 0.2.

La distancia mínima entre el último elemento del corrector hasta el punto focal debe ser de 80mm, para poder colocar otros elementos optomecánicos. El peso del corrector de foco primario no puede alterar el balance original del telescopio.

1.3.10. Modos de operación

El corrector de foco primario deberá poder operar en la configuración $f/5$ integrado en un sistema optomecánico que sea totalmente removible del tubo del telescopio.

1.4. Antecedentes

Quando se usa el término *corrector de foco primario* en el área de la instrumentación astronómica, se refiere básicamente a algún sistema óptico que se coloca antes del plano imagen, generalmente cerca de él, y que tiene como función principal la corrección de las aberraciones generadas por el sistema óptico del telescopio [26]. Telescopios reflectivos con aperturas mayores a 50cm, por ejemplo, usan generalmente un conjunto de dos espejos que, aunque alargan la longitud focal final del telescopio por encima de la longitud focal del espejo primario solo, igualmente hace más compacto el recorrido de la luz y por lo tanto, la longitud del tubo del telescopio. Cada espejo tiene su punto focal y en conjunto, determinan la longitud focal del telescopio. En algunos casos, cuando originalmente el telescopio cuenta con dos espejos, se puede remover el espejo secundario y trabajar sólo con el primario. El mayor problema de esto, es que generalmente no se obtienen por sí mismo buenas imágenes bajo esta configuración. Para lograr imágenes de calidad con el espejo primario, es necesario corregir las aberraciones que se producen en el plano focal. En este caso, al sistema óptico que logrará dicha corrección se le llamará *corrector de foco primario*. Si el espejo primario no es capaz de formar imágenes axiales aceptables, entonces el corrector también deberá corregir las aberraciones axiales para lograr esto. Normalmente, se busca que estos correctores sean aproximadamente afocales para que no se modifique el

número f del telescopio (relación entre la distancia focal del telescopio y su diámetro) y por lo tanto, su escala.

La implementación de dos espejos, uno cóncavo y uno convexo, como principales componentes ópticos del telescopio, aparte de compactar la trayectoria del camino óptico del haz de luz, como se mencionaba anteriormente, también permite corregir aberraciones extra-axiales introducidas principalmente por el espejo primario del telescopio.

Tal como lo reseña Wynne en su artículo de 1968 [28], los primeros correctores de foco primario fueron ideados por F. E. Ross en 1935 [16]. Estos sistemas correctivos que describió en ese trabajo, consisten básicamente de un par de lentes delgadas que en conjunto son afocales y que apenas están en contacto entre sí. El diseño que realizó Ross estaba abocado a corregir el coma, la curvatura de campo y el astigmatismo primario generados por un espejo parabólico primario. Sin embargo, cuando se emplea el doblete para corregir dichas aberraciones, éste introduce aberración esférica primaria que queda remanente en el sistema. La cantidad de dicha aberración esférica residual varía en función de la ubicación del doblete en el sistema, siendo cada vez menor a medida que el doblete se acerca al plano focal. No obstante, si la distancia entre el doblete y el plano focal es muy pequeña, entonces las curvaturas de las lentes del doblete deben ser muy pronunciadas para poder corregir el coma y el astigmatismo del sistema.

Con el propósito de lograr la corrección simultánea de las aberraciones esférica, coma y astigmatismo, Ross hizo una modificación a su primer diseño anteriormente descrito. La modificación se basó en la incorporación de un tercer elemento refractivo, conocido como *menisco*, que sería delgado, prácticamente afocal y con curvatura cóncava respecto al espejo primario. El menisco estaría dispuesto a una cierta distancia detrás del doblete respecto al plano focal del espejo primario. Este último diseño de Ross, mostrado en la figura 1.1, el cual describió Wynne en 1965 [27], fue el que aplicó Ross para corregir las aberraciones del telescopio reflector de 5m de apertura del Observatorio de Monte Palomar.

En su trabajo de 1974 [29], Wynne mostró un nuevo sistema correctivo compuesto por tres elementos refractivos para primarios parabólicos e hiperbólicos y en su trabajo de 1965 [27], Wynne planteó otro triplete para telescopios del tipo Ritchey-Chrétien. En este tipo de telescopio, cuando se

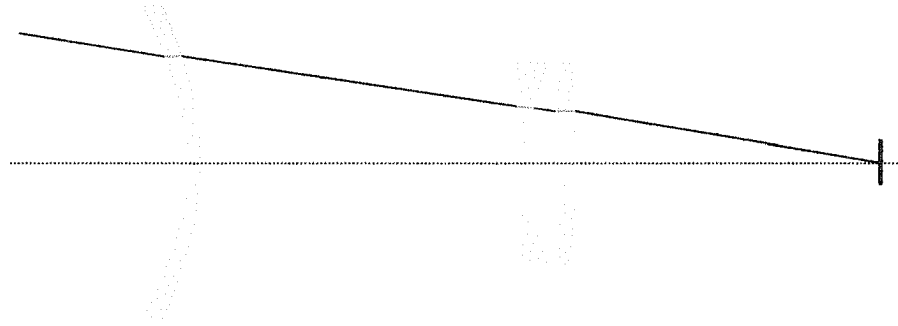


Figura 1.1: Triplete de Ross

trabaja sólo con su espejo primario que es hiperbólico, se presentan las mismas aberraciones de coma, astigmatismo y curvatura de campo primaria que con un primario parabólico con igual longitud focal y apertura. El enfoque alternativo al triplete de Ross que Wynne mostró en ese trabajo, se basa en un doblete encargado de corregir la aberración esférica y el coma generados por el espejo primario, esto unido a un tercer elemento convergente que, a diferencia del tercer elemento del triplete de Ross, está cercano al plano focal, encargado de corregir el astigmatismo total del sistema, generado en conjunto por el doblete y el propio del espejo. Unas de las ventajas del *triplete de Wynne*, mostrado en la figura 1.2, respecto al de Ross (descritas por el mismo Wynne), es que permite un grado de corrección de aberraciones considerablemente mayor y que los sistemas ópticos son más compactos. Sistemas correctivos de este tipo, fueron diseñados por Wynne para el telescopio Mayall de 4 metros del observatorio de Kitt Peak en 1973 y el telescopio Anglo-Australiano en 1975.

La literatura referente a correctores de foco primario para espejos primarios parabólicos e hiperbólicos, es relativamente extensa y variada en comparación con la referente a la de correctores para primarios esféricos. De hecho, no hay ningún trabajo que reporte algún sistema que logre la corrección de aberraciones de primarios esféricos para un campo igual o mayor a un grado cuadrado. Uno de los dos únicos correctores conocidos que logran un campo circular de medio grado para primarios esféricos es el mostrado en el trabajo de Jones & James de 1992 [9] y representa una referencia importante

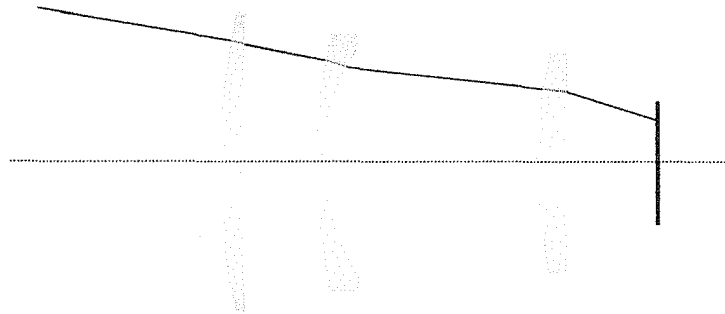


Figura 1.2: Triplete de Wynne

a considerar, ya que el espejo primario del Telescopio Reflector de 1m del OAN también es esférico. En este trabajo, los autores plantean un sistema como el expuesto en la figura 1.3, formado por cuatro elementos refractivos del mismo material, dispuestos en dos pares separados entre sí. Según explican, el primer doblete elimina casi totalmente la aberración esférica de tercer orden del espejo primario, “sobrecorriges” el coma por casi la mitad su valor e introduce astigmatismo al sistema, así que el segundo doblete, el más cercano al plano focal, se encarga de corregir el coma y astigmatismo de tercer orden total generado por el espejo primario y el doblete anterior. Este último doblete prácticamente no introduce aberración esférica al sistema, y en conjunto con el primer doblete, introducen algo de curvatura de campo al sistema. Aplicando este corrector a un telescopio con número $f = 5.4$ y con distancia focal de 2381.25 mm, los autores lograron un campo útil circular de 0.5° .

Finalmente, el otro diseño de vital consideración en este trabajo, fue el realizado por Della Prugna y Schenner en 2009 [6], donde presentaron el corrector híbrido de foco primario que actualmente utiliza el Telescopio Reflector de 1m del OAN. A este corrector también se le conoce con el nombre de GAnAs (**Grupo** óptico de corrección **An**astigmático **As**férico) y está compuesto por tres elementos refractivos del mismo material. El término *híbrido* se refiere a la utilización combinada de elementos esféricos tradicionales y placas con perfiles asféricos. En este caso, el perfil de asfericidad está definido por po-

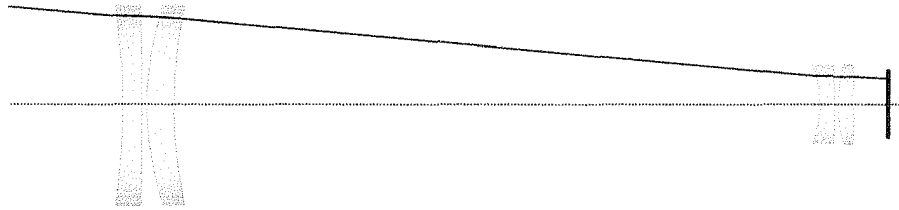


Figura 1.3: Corrector de Jones & James

linomios de cuarto orden. Este corrector de foco primario, presentado en la figura 1.4, logra con las primeras dos placas asféricas corregir la aberración esférica y el coma de tercer orden del espejo primario. Luego sólo con el tercer elemento, que es un menisco negativo, se logra corregir simultáneamente el astigmatismo y la curvatura de campo del sistema. Con este sistema se logran imágenes policromáticas menores a $1.5''$ (más pequeñas que el *seeing* típico del OAN) sobre un campo circular de 0.5° .

El conjunto de estos trabajos anteriormente mencionados, fijan las bases estratégicas para el proceso de diseño de los correctores de foco primario. En las siguientes secciones, se explicarán las bases teóricas y metodológicas del diseño del nuevo corrector de foco primario para el telescopio de 1m del OAN que se desea realizar.

2

Marco teórico

Las aberraciones juegan un papel fundamental en la calidad de imagen final de un sistema óptico. Es por eso que poder conocerlas, caracterizarlas y cuantificarlas, es fundamental para poder minimizarlas. En este capítulo se mostrarán detalles importantes de las aberraciones, como su clasificación y cuantificación por medio de la teoría de aberraciones de Seidel, además de los tipos de superficies ópticas más comunes y su implementación en los diferentes sistemas correctivos para diversos tipos de telescopios.

2.1. Aberraciones ópticas

La forma precisa de conocer el recorrido de la luz a través de un medio o de un elemento óptico, es usando la técnica del *trazado de rayos*. Esta técnica se basa en la aplicación de la ley de Snell en cada interfaz por la que pasa el haz de luz, para poder determinar su dirección final¹. La función seno en la ley de Snell se puede expresar mediante una expansión en series de Taylor

$$\text{sen}\theta_1 = \theta_1 - \theta_1^3/3! + \theta_1^5/5! - \theta_1^7/7! + \theta_1^9/9! - \dots \quad (2.1)$$

donde el ángulo θ_1 se refiere al ángulo de incidencia del haz sobre plano normal de la superficie. Entonces, para ángulos de incidencia cercanos a cero, la función seno se puede aproximar como $\text{sen}\theta_1 \simeq \theta_1$. A esta aproximación de primer orden, también se le conoce como *aproximación paraxial*.

¹Las superficies reflectivas se consideran con un índice de refracción $n = -1$

En teoría, un sistema óptico perfecto forma su imagen en el lugar y con el tamaño que predice la aproximación paraxial, sin embargo, generalmente por las curvaturas de las lentes y/o rompimiento del régimen paraxial, estas predicciones ya no se cumplen. Las mediciones de cuánto difieren las imágenes del sistema respecto a la aproximación paraxial, es lo que se conoce como aberraciones [14].

Cualitativamente, las aberraciones se manifiestan cuando un sistema óptico es incapaz de formar imágenes puntuales de objetos puntuales y pueden clasificarse en dos grupos: aberraciones de punto y aberraciones de forma. El primero de ellos se refiere a las aberraciones que hacen que la imagen modifique su distribución (donde en lugar de ser puntual, es una “mancha”), sin alterar la posición predicha por la óptica paraxial. Estas aberraciones son la esférica, el coma y el astigmatismo. El grupo de las aberraciones de forma, se refiere a las aberraciones que hacen que la posición de la imagen sea distinta de la establecida por la aproximación paraxial, sin modificar la forma de la imagen, es decir, se mantiene puntual. Estas aberraciones son la curvatura de campo y la distorsión. Cada una de estas aberraciones serán expuestas a continuación [25].

2.1.1. Aberración esférica

Esta aberración se genera cuando los rayos que inciden sobre la superficie de la lente o espejo a alturas mayores a las que rigen la aproximación paraxial, no tienen el mismo punto focal que los rayos paraxiales. Así, tal como se aprecia en la figura 2.1, a medida que los rayos inciden a mayor altura respecto al eje óptico, éstos convergen antes o después, para los casos de superficies convergentes o divergentes respectivamente, que los rayos paraxiales.

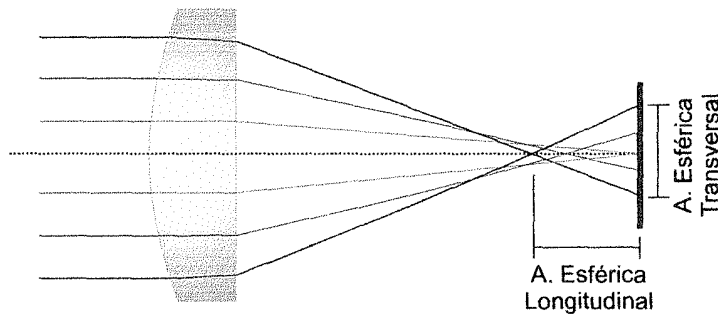


Figura 2.1: Sistema con aberración esférica

La aberración esférica es la única que se produce con rayos paralelos al eje óptico, también conocidos como *axiales*. Su magnitud depende de la forma de la lente o del espejo, de su orientación y del material del cual esté hecho. La aberración esférica presenta dos componentes diferentes, la longitudinal y la transversal. El primero se refiere a la distancia entre el punto focal de la imagen y el plano focal del sistema, mientras que la segunda se refiere a la altura medida sobre el plano focal del sistema, entre el eje óptico y el corte del rayo del objeto al plano focal [10].

2.1.2. Coma

Cuando los rayos que inciden sobre la superficie no son axiales, entonces aparecen diversas aberraciones cuyas magnitudes dependen del ángulo y la altura que lleven respecto al eje óptico. A estas aberraciones se les cataloga como *extra-axiales*. El coma es una de ellas, y se le llama así porque la forma de la imagen que genera de un objeto o fuente puntual es similar a la de un cometa. En la figura 2.2 se ve que al pasar los haces de luz por cada zona concéntrica de una lente, se forma una imagen en forma de anillo llamado círculo de coma. Esto causa una visión borrosa en el plano imagen de estos rayos extra-axiales [14].

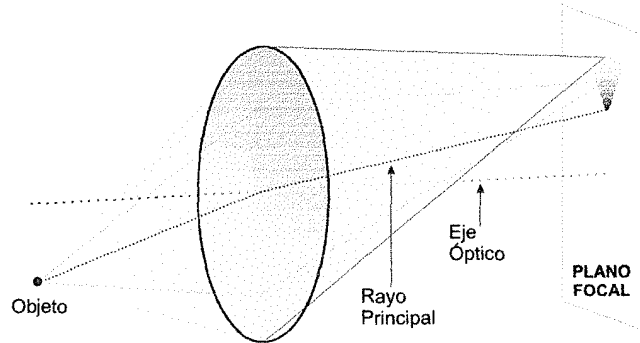


Figura 2.2: Sistema con coma

2.1.3. Astigmatismo

Detallando algunas zonas donde se ubican los haces de luz que pasan por un sistema óptico, se pueden distinguir el *plano tangencial* que es el que contiene al rayo principal y al eje óptico, y el *plano sagital* es el perpendicular al tangencial y que contiene al rayo principal. Se denomina *rayo principal* al que va desde el punto objeto y pasa a través del centro de la apertura del sistema de lentes.

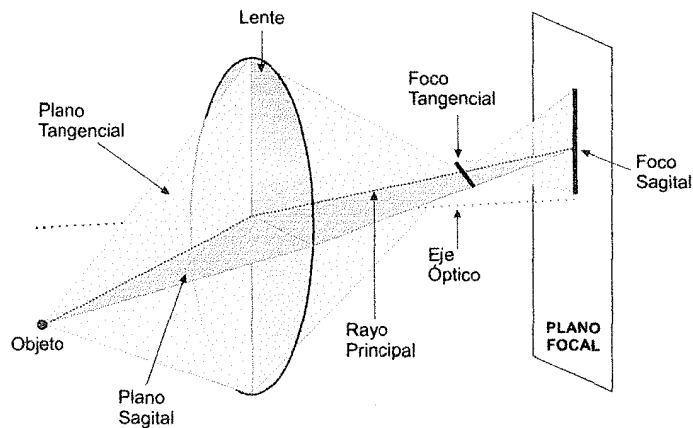


Figura 2.3: Sistema con astigmatismo

Los rayos que entran por los distintos planos mencionados se enfocan en distintos puntos, como se observa en la figura 2.3, llamados según el plano de origen, es decir, existe un foco tangencial y otro sagital. La imagen que se produce en el foco tangencial, es una línea recta en dirección al plano sagital, e igualmente sucede con el foco sagital respecto al tangencial. Existe un punto intermedio a estos dos focos, mostrado en la figura 2.4, donde se consigue una imagen relativamente circular a la que se le conoce como *círculo de mínima confusión*.

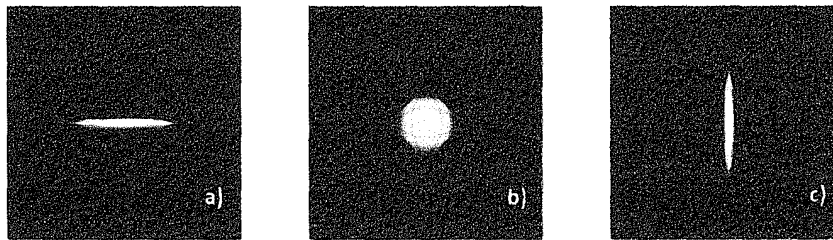


Figura 2.4: Las imágenes *a*, *b* y *c*, corresponden al foco tangencial, círculo de mínima confusión y foco sagital, respectivamente

Finalmente, el astigmatismo está definido como la separación de estos focos [14].

2.1.4. Aberración cromática

La aberración cromática es diferente al resto de las aberraciones debido a que es producida por el fenómeno de la dispersión. Esta aberración tiene diferentes comportamientos en función del ángulo y altura del haz, así como del tipo de medio que atraviesa. Así, se clasifica la aberración como axial o lateral. En el caso de la aberración cromática axial, la posición del punto focal depende de la longitud de onda, aunque todos estos puntos focales, tal como se observa en la figura 2.5, se mantienen en el mismo eje. Este tipo de aberración sólo se produce en elementos refractivos, en especial cuando la luz pasa hacia los bordes de ellos.

Por otro lado, la aberración cromática lateral se produce cuando los haces de luz son oblicuos, y hace que el tamaño de la imagen dependa de la longitud de onda, aunque compartan el mismo punto focal.

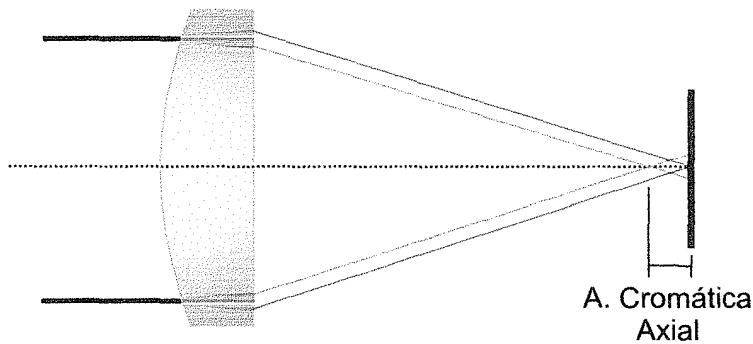


Figura 2.5: Sistema con aberración cromática

www.bdigital.ula.ve

2.1.5. Curvatura de campo

Aún en ausencia de las demás aberraciones mencionadas, el sistema óptico tiene la tendencia a generar una superficie focal que no es plana. Como se ve en la figura 2.6, esta superficie suele ser curva y el efecto que genera esta tendencia es lo que se conoce como curvatura de campo. Cuando existe la presencia de astigmatismo remanente en el sistema, el problema se combina y complica debido a las dos superficies focales correspondientes a los focos astigmáticos.

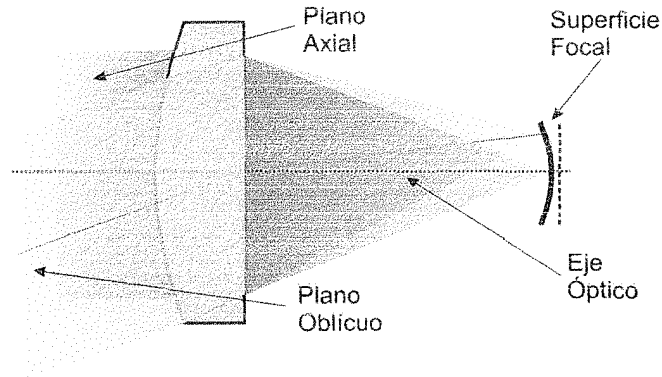


Figura 2.6: Sistema con curvatura de campo

2.1.6. Distorsión

El término distorsión, se refiere a que aunque a un objeto puntual le corresponda una imagen puntual, su ubicación es diferente a la que predice la teoría paraxial. Igualmente, la magnitud de la distorsión aumenta a medida que aumenta la altura del haz. Cualitativamente, la distorsión se clasifica en dos tipos, siendo ellas la distorsión de *barril* y la de *corsé*, nombres basados en el aspecto que genera en la imagen.

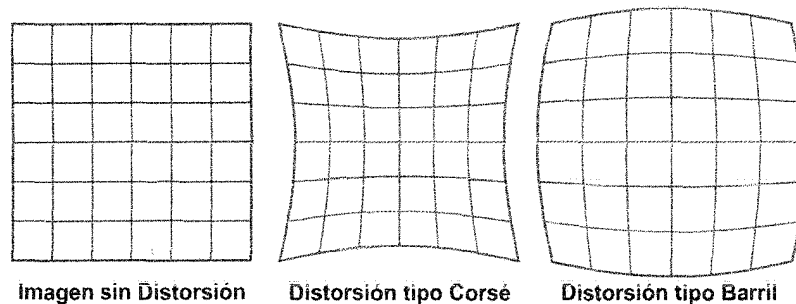


Figura 2.7: Tipos de distorsión

2.1.7. Teoría de aproximación del tercer orden de Seidel

Las aberraciones casi siempre se manifiestan en conjunto, siendo la imagen final una mezcla desigual de ellas. Hasta ahora, el planteamiento bajo el cual se han descrito las aberraciones ha sido cualitativo. Sin embargo, cuando se requiere hacer un análisis cuantitativo de la presencia y evolución de las aberraciones en los sistemas ópticos, especialmente a la hora de diseñarlos, generalmente se utiliza la teoría de aproximación de tercer orden de Seidel. Ésta, resumida en su trabajo de 1856 [18], le permitió estimar cada una de las aberraciones presentes en una imagen sin tener que trazar un gran número de rayos que pasaran a través del sistema óptico. Ésto lo logró utilizando los términos de la expansión de la función seno en Taylor de la ecuación 2.1 hasta el tercer orden (de ahí el nombre de la teoría), y las condiciones de simetría de los sistemas ópticos [14].

La derivación de las expresiones para la contribución de cada superficie a las aberraciones primarias, junto con la declaración de los coeficientes de aberración, también fue mostrada por Seidel en el trabajo ya mencionado. La deducción detallada de las ecuaciones que rigen su teoría se encuentra en Welford [25]. Los coeficientes de aberración planteados por Seidel, fueron cinco y denotados como S_I, S_{II}, \dots, S_V . Las fórmulas de estos coeficientes (según la nomenclatura de Mouroulis, P., y Macdonald J., [15]) son:

$$\begin{aligned}
 S_I &= - \sum_{i=1}^k A_i^2 h_i \Delta \left(\frac{u}{n} \right)_i \\
 S_{II} &= - \sum_{i=1}^k A_i \bar{A}_i h_i \Delta \left(\frac{u}{n} \right)_i \\
 S_{III} &= - \sum_{i=1}^k \bar{A}_i^2 h_i \Delta \left(\frac{u}{n} \right)_i \\
 S_{IV} &= - \sum_{i=1}^k H^2 c_i \Delta \left(\frac{1}{n} \right)_i \\
 S_V &= \sum_{i=1}^k \frac{\bar{A}_i}{A_i} [(S_{III})_i + (S_{IV})_i]
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Donde k es el número total de superficies, $A = n(hc + u)$ es la invariante sobre la refracción, $H = n(\bar{h}u - h\bar{u})$ es la invariante de Lagrange, h es la altura del rayo paraxial incidente, c es la curvatura de la superficie refractiva, u es el ángulo paraxial, n es el índice de refracción del medio y $\Delta(u/n)_i = u_{i+1}/n_{i+1} - u_i/n_i$.

Estos coeficientes se relacionan con los coeficientes de aberración de onda primaria de la siguiente manera:

Aberración esférica	${}_0W_{40} = S_I/8$	
Coma	${}_1W_{31} = S_{II}/2$	
Astigmatismo	${}_2W_{22} = S_{III}/2$	(2.3)
Curvatura de campo	${}_2W_{20} = (S_{III} + S_{IV})/4$	
Distorsión	${}_3W_{11} = S_V/2$	

2.2. Superficies ópticas

Las superficies ópticas representan la interfaz sobre la cual el haz de luz será reflejado y/o refractado. Generalmente, cuando se hace el diseño de un elemento o sistema óptico, se usan diferentes parámetros, tales como el índice de refracción, curvaturas y espesores, para lograr modelar el camino óptico de la luz y conseguir que se comporte de alguna manera que se requiera. En esta sección, se mostrarán algunos de los tipos de superficies refractivas y reflectivas que más se usan dentro de los correctores de foco primario y componentes ópticos de los telescopios.

2.2.1. Esféricos convencionales y “Lens bending”

Las lentes son componentes ópticos de tipo refractivos, ya que están hechos de materiales transparentes y en el mejor de los casos homogéneos, lo que hace que la luz pueda ser transmitida y refractada a través de ellos. Las más comunes son las lentes delgadas (figura 2.8). En casi todos los casos los tipos de superficies que presentan las lentes son planas, cóncavas y convexas. Estas dos últimas tienen un perfil esférico, entre otras cosas porque son los perfiles más fáciles de generar y probar, además que en los elementos refractivos, la potencia de la lente (que es la capacidad que tiene para desviar los rayos incidentes) depende mayoritariamente de los radios de curvaturas,

espesor de la lente y material que lo compone, en vez de la excentricidad del perfil de su superficie. Las lentes poseen dos superficies por las cuales tiene que pasar el haz de luz y tienen la ventaja de poder presentar curvaturas diferentes en ellas para modificar la trayectoria del haz incidente.

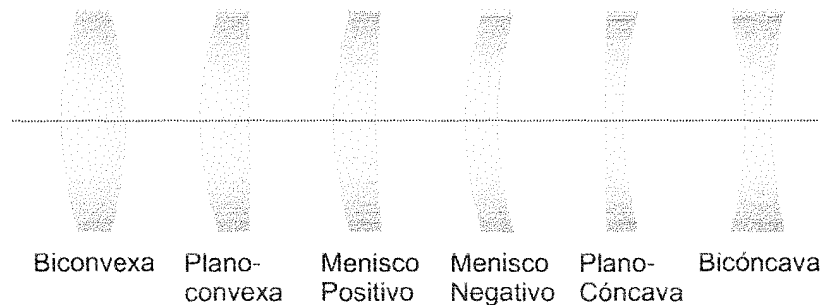


Figura 2.8: Tipos de lentes según sus curvaturas

El cambio de las curvaturas de las superficies de las lentes, sin alterar la distancia focal, es lo que se conoce como *lens bending*, y lo que permite mantener esta relación entre las curvaturas para no alterar la potencia de la lente, es lo que se conoce como el *Factor de Forma de Coddington* q , definido como

$$q = \frac{r_2 + r_1}{r_2 - r_1} = \frac{c_1 + c_2}{c_1 - c_2}, \text{ con } c = \frac{1}{r} \quad (2.4)$$

En el caso de los espejos, los de perfiles esféricos fueron los primeros que se usaron para los telescopios reflectivos, pero por la cantidad de aberración esférica que introducen al sistema, fueron reemplazados en popularidad por los de otros perfiles cónicos.

2.2.2. Espejos cónicos

Se les conoce como espejos cónicos a los que poseen un perfil con una excentricidad diferente a la esfera, aunque ésta forma parte del grupo. Entre ellos se encuentran los paraboloides, hiperboloides y elipsoides prolatos y oblatos.

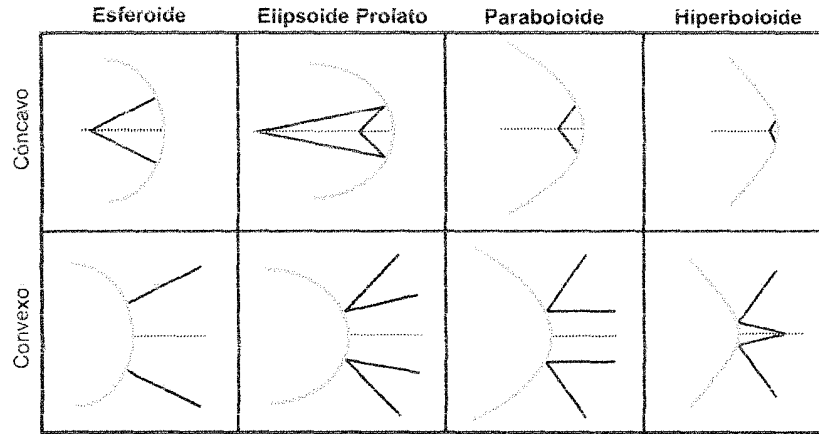


Figura 2.9: Espejos con diferentes excentricidades

La siguiente es la ecuación que define los perfiles cónicos:

$$z = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (1 - e^2)c^2y^2}} \quad (2.5)$$

donde z es la sagita, y es la altura radial de la superficie y c es la curvatura de la superficie dada en el ámbito paraxial $2c = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$. Frecuentemente, en la literatura se encuentra que la sección cónica viene descrita en término de una constante cónica K , donde $K = -e^2$. Las superficies cónicas en función tanto de e como de K , son las siguientes:

Superficie cónica	Excentricidad	Constante cónica
Elipsoide oblató	$e < 0$	$K > 0$
Esferoide	$e = 0$	$K = 0$
Elipsoide prolato	$0 < e < 1$	$-1 < K < 0$
Paraboloide	$e = 1$	$K = -1$
Hiperboloide	$e > 1$	$K < -1$

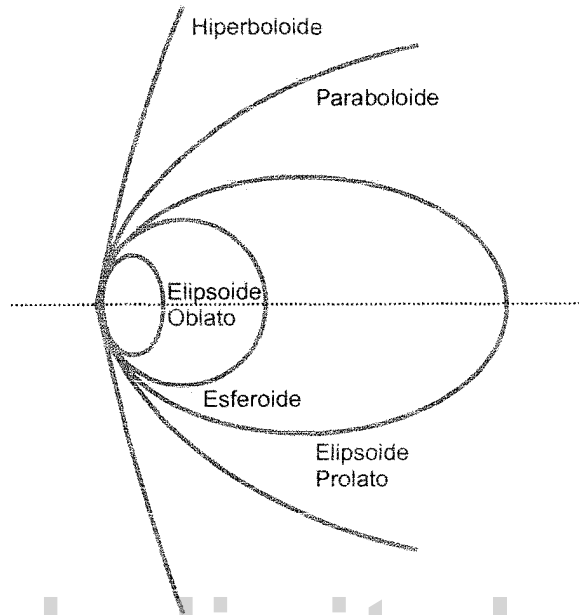


Figura 2.10: Curvas que representan los perfiles cónicos

Actualmente, los espejos más usados para la óptica de los telescopios son los hiperbólicos y los parabólicos. Aunque estas superficies son más difíciles de generar, tienen la ventaja que al usarse en conjunto como en un telescopio Cassegrain clásico o en un Ritchey-Chrétien, se eliminan las aberraciones esférica y el coma.

2.2.3. Asféricos

En general, las superficies asféricas son aquellas que presentan un perfil con una deformación de cuarto orden, e incluso mayor, sobre una superficie que puede ser plana o curva. La ecuación que describe la deformación de una superficie asférica viene dada por la relación:

$$z = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (1 - e^2)c^2y^2}} + Ay^4 + By^6 + Cy^8 + Dy^{10} \quad (2.6)$$

Donde A , B , C y D son los coeficientes de orden de asféricidad. Aunque las superficies esféricas logran la corrección de aberraciones de tercer y mayor orden, y además pueden reducir el número de elementos en un sistema óptico, este tipo de superficies son más complicadas de generar y probar, por lo tanto son más costosas que las esféricas o las cónicas [2], [11].

2.3. Sistemas correctivos

Hasta ahora se han considerado elementos ópticos convencionales de corrección para sistemas de un espejo principal. En esta sección se mostrará que es posible tener sistemas correctivos que minimicen, total o parcialmente, las aberraciones de sistemas ópticos con más de una superficie. A continuación se presentarán algunos ejemplos de ellos.

2.3.1. Sistemas refractivos

El telescopio Schmidt

El sistema correctivo del telescopio Schmidt mostrado en la figura 2.11, es una placa esférica dispuesta concéntrica al centro de curvatura del espejo. Uno de los puntos más importantes de este sistema es justamente la ubicación de dicha placa, ya que colocar una pupila en el centro de curvatura del espejo esférico hace que se el sistema quede libre de rayos oblicuos o fuera de eje.

Este hecho es importantísimo, debido a que son los rayos fuera de eje los que producen las aberraciones extra-axiales. Así, logrando eliminarlos, las únicas aberraciones restantes son la esférica y la curvatura de campo. Con la placa esférica se logra eliminar la aberración esférica del sistema mediante la variación de los coeficientes de asféricidad, presentados en la ecuación 2.6. Para hacer la corrección de tercer orden de la aberración esférica, los coeficientes de asféricidad tienen la siguiente forma:

$$A = \frac{-2(\text{diam}/2)K}{4(n-1)R^3}$$

$$B = \frac{1}{4(n-1)R^3}$$

El parámetro adimensional del perfil esférico K , tiene valores $0 \leq K \leq 1$.

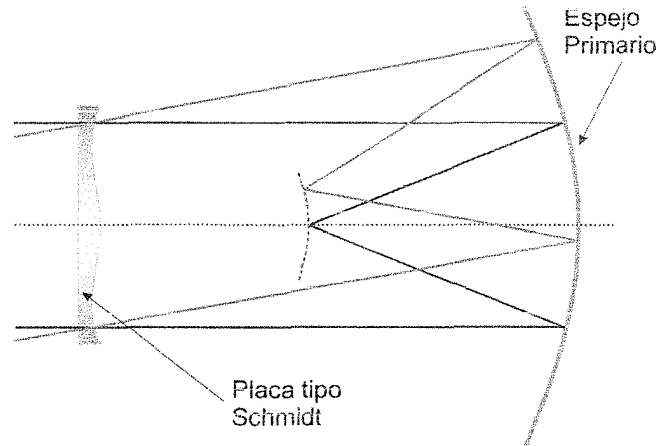
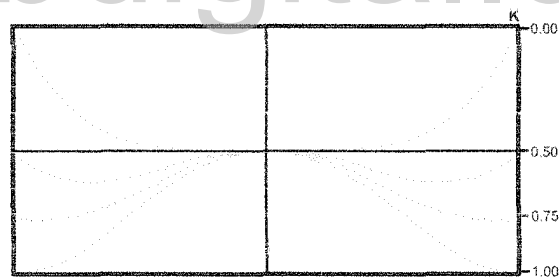


Figura 2.11: Telescopio tipo Schmidt

Este tipo de placas introduce la misma magnitud de aberración esférica total del sistema pero con el signo contrario, neutralizando así la aberración.

Figura 2.12: Perfiles asféricos en función de K

En la figura 2.12 se muestra como varía el perfil de la placa asférica en función de dicha constante. Adicionalmente, dependiendo del fotoreceptor a usar, se puede incorporar una lente aplanadora al sistema para corregir la curvatura de campo remanente del sistema. Sin embargo, éste no forma parte del sistema inicial del telescopio Schmidt [19], [26].

El telescopio Maksutov

Este tipo de telescopio (figura 2.13), tiene una configuración similar al Schmidt pero en lugar de una placa asférica, utiliza un menisco negativo. En ambos tipos de telescopios, la aberración cromática es un problema importante que se tolera sólo usando filtros ópticos que limitan las longitudes de onda que alcanzan el plano focal. La solución de Maksutov tiene dos ventajas principales respecto al telescopio Schmidt. La primera es la disminución, en al menos un tercio, de la longitud del sistema óptico, aunque necesariamente se mantiene la ubicación de la pupila en el centro de curvatura del espejo esférico por las razones anteriormente mencionadas. La segunda ventaja, es que el menisco por tratarse de un elemento convencional, es más fácil y menos costoso de fabricar que una placa asférica tipo Schmidt. Una descripción detallada de los parámetros de este menisco y del sistema óptico en general, se puede encontrar en Schroeder [19].

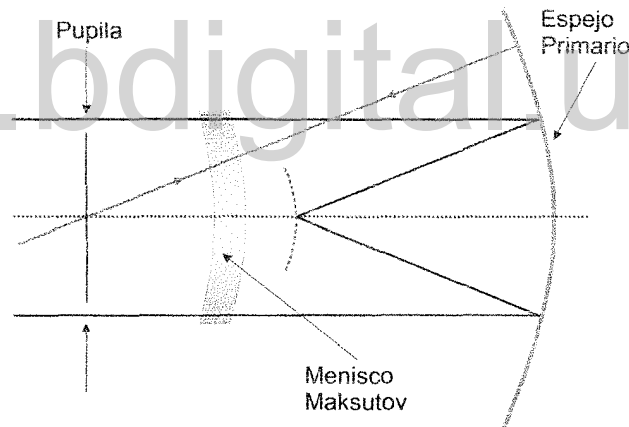


Figura 2.13: Telescopio tipo Maksutov

A pesar de que ambos sistemas están conformados por un espejo esférico, monolítico no perforado, como el espejo del Telescopio Reflector de 1m del OAN, ninguno de ellos es factible de aplicar a este telescopio debido a que no cumplen con las dimensiones máximas explicadas en la sección de requerimientos y especificaciones. Igualmente, se considera que el costo de la placa

de vidrio, por sus dimensiones, espesor y composición para cubrir los rangos espectrales deseados sería muy alto. Por todo lo anterior es que se descartan estos dos sistemas correctivos para el diseño final que se desea realizar.

2.3.2. Sistemas reflectivos

Telescopio Ritchey-Chrétien

Este telescopio está compuesto por dos espejos hiperbólicos. Aunque debido a esta excentricidad para el foco primario no se logra corregir la aberración esférica, en conjunto, los dos espejos logran corregir la aberración de coma y esférica en el foco secundario. Es por esto último que se considera que el telescopio Ritchey-Chrétien es *aplanático*. Para este sistema, la ubicación de la pupila no es determinante para el astigmatismo. Justo es esta aberración la más importante que queda remanente en el sistema y es la que limita realmente el campo de visión del telescopio. Debido al número y tipo de elementos que componen al Ritchey-Chrétien, éste ha sido ampliamente elegido entre los constructores de los grandes telescopios de 2m de apertura o mayor, incluyendo el 2.4-m del Telescopio Espacial Hubble. ([19], [13])

Telescopio Dall-Kirkham

El telescopio Dall-Kirkham también está compuesto por dos espejos, pero en este caso, el primario es elíptico y el secundario esférico. Esta configuración presenta varias ventajas respecto al anteriormente mencionado Ritchey-Chrétien. Aunque ambos espejos son cónicos, éstos son más fáciles de generar y probar que los espejos hiperbólicos. Como el espejo secundario tiene forma esférica, el telescopio, en su calidad de imagen axial, se vuelve menos sensible a pequeños desajustes. Sin embargo, este tipo de sistema también presenta desventajas respecto a los de tipo aplanático. La más importante es la gran cantidad de coma y astigmatismo remanente. En este caso Malacara [13] indica que el coma es $(m_s^2 + 1)/2$ veces mayor que en un telescopio Cassegrain². Es por esto que proporcionalmente se reduce el campo útil de visión por el mismo factor [19].

²Siendo m_s el aumento lateral

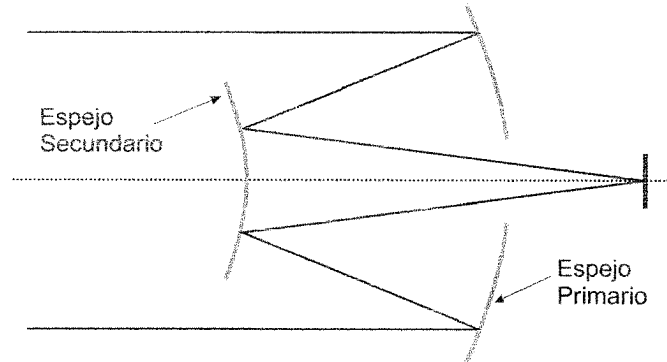


Figura 2.14: Estructura de sistemas reflectivos con dos espejos

2.3.3. Sistemas híbridos

Telescopio Schmidt-Cassegrain

Un telescopio tipo Schmidt-Cassegrain concéntrico como el de la figura 2.15, está constituido por tres elementos, dos espejos esféricos concéntricos (DeVany, 1965 [7]) y una placa asférica correctiva. Además, la pupila está ubicada, tal como en el sistema original de un telescopio Schmidt, justo en el centro de curvatura del espejo primario. Esta configuración concéntrica, logra evitar la generación de las aberraciones extra-axiales, y la placa asférica corrige la aberración esférica del sistema, quedando sólo la curvatura de campo remanente y algo de esferocromatismo por esta placa refractiva. En este telescopio la relación entre la longitud focal efectiva y la longitud focal del espejo primario se fija a un valor ligeramente mayor que 2, dependiendo del valor de s , que es la distancia desde el vértice del espejo primario hasta el foco secundario del sistema [13].

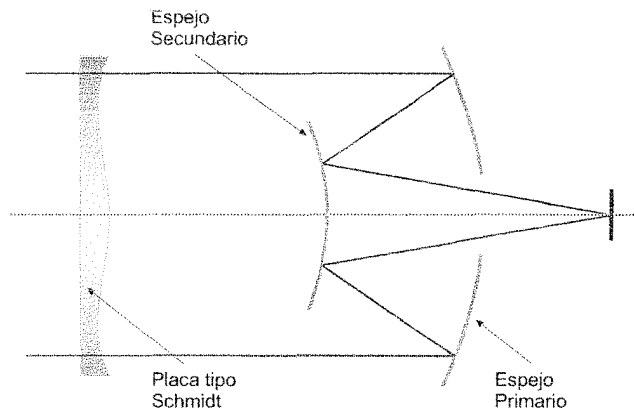
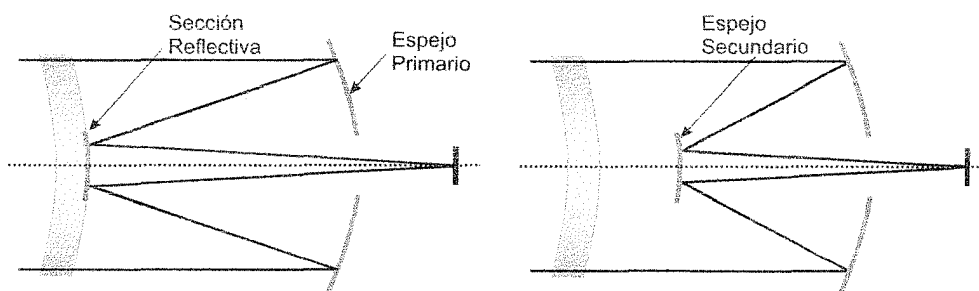


Figura 2.15: Telescopio tipo Schmidt-Cassegrain

Telescopio Maksutov-Cassegrain

El diseño de un telescopio Maksutov-Cassegrain es similar al Schmidt-Cassegrain, ya que igualmente tiene dos elementos reflectivos y otro refractivo. En este caso, el elemento refractivo no es una placa asférica sino un menisco grueso. Este menisco puede tener una sección del área central de su cara convexa con un recubrimiento reflectivo (Spot Maksutov), para evitar tener que usar uno de los espejos. Sin embargo, usualmente el espejo secundario está separado del menisco [24], [13].

Figura 2.16: Telescopios tipo Maksutov-Cassegrain con igual $f/\#$

En la figura 2.16 se muestran dos configuraciones diferentes del mismo sistema Maksutov-Cassegrain que tienen la misma escala. Este tipo de telescopio presenta gran cantidad de coma y astigmatismo que no puede ser corregido porque el espejo secundario está dispuesto en la parte posterior del corrector. La relación focal limitante para un Maksutov-Cassegrain con tres componentes ópticos esféricos parece ser aproximadamente $f/4$. La aberración presente en sistemas más rápidos se hace intolerable cuando se usan sólo superficies esféricas, [17].

A partir de estas configuraciones se puede exponer el concepto de *parámetros libres*, que es fundamental a la hora de diseñar sistemas ópticos. El término se refiere a la capacidad de modificar parámetros en los elementos que componen un sistema óptico para que, en conjunto, logren la calidad de imagen deseada. Los parámetros que generalmente se toman como grados de libertad son los radios de curvatura junto con el *bending*, el espesor de la lente, el perfil de la superficie (ya sea cónico o esférico), la separación entre superficies y el índice de refracción del material. En los cuatro diseños mostrados se nota cómo, haciendo uso de esos grados de libertad, se logran diferentes configuraciones que logran el mismo resultado, uno más compacto y otros con menos elementos ópticos.

3

Metodología

En este capítulo se mostrarán las estrategias que se siguieron para poder cumplir debidamente con todos los objetivos planteados en el proyecto.

Los sistemas correctores de foco primario requieren de muchas pruebas de desempeño óptico antes de su fabricación. Las pruebas realizadas incluyeron la simulación del comportamiento de los haces de luz al pasar por el sistema óptico en los diferentes ángulos de inclinación y longitudes de onda que se desean estudiar. En esta etapa del diseño, la aproximación de tercer orden de Seidel fue el pilar fundamental que permitió cuantificar las aberraciones en los sistemas ópticos. Por medio de la minimización de sus coeficientes, fue posible llegar a una solución aproximada. Luego, a partir de pequeñas variaciones de sus parámetros libres, se pudo encontrar el sistema resultante que cumplió con los requerimientos inicialmente establecidos. Para calcular el valor de estos coeficientes y llevar a cabo el trazado de rayos riguroso, se usó el software de simulación Zemax^{®1}. Este software es utilizado como estándar por los científicos e ingenieros para el diseño de lentes, elementos reflectivos, instrumentos ópticos, colimadores láser, sistemas de iluminación y permite simular los sistemas basados en óptica tanto geométrica como ondulatoria. Todo el conjunto de pruebas y análisis que se describirán, sentaron las bases para obtener el sistema más adecuado antes de su fabricación.

¹Aunque existen otros programas de simulación y evaluación de sistemas ópticos como OSLO[®] y CODE-V, se decidió utilizar Zemax[®] porque la fundación CIDA tiene disponibilidad de su licencia.

3.1. Definición del diseño óptico

Este proyecto, tal como se señaló en la sección 1.4, no cuenta con referencias de trabajos anteriores que hayan logrado corregir las aberraciones de un primario esférico para un campo igual o mayor al de un grado cuadrado. Se sabe que son pocos los observatorios a nivel mundial que poseen telescopios con primarios esféricos. El que no se haya encontrado hasta el momento una solución que corrija sus aberraciones para campos extensos, aún cuando los espejos con perfil esférico son los más sencillos de generar, hizo considerar la posibilidad de que no hubiera solución para campos con estas dimensiones, sobre todo porque los espejos esféricos introducen todas las aberraciones (menos la cromática) y éstas aumentan potencialmente con la expansión del campo de visión. Así que tratándose en este caso de un campo de un grado cuadrado, era posible que las aberraciones tuvieran una magnitud tal que no fuera factible minimizarlas en conjunto. Por otro lado, se contempló el caso favorable de que existiese una solución, aunque seguramente no resultase de configuraciones con elementos y estrategias de diseño convencionales. Es por eso que la concepción inicial de este corrector fue la de lograr su campo objetivo sólo con elementos reflectivos o con un sistema híbrido que tuviera buena transmitancia en todo el rango espectral requerido, en especial en las bandas del UV y azul. Lograr esto garantizaría aportar un diseño novedoso a la familia de correctores de foco primario conocidos, además de lograr un sistema compacto gracias al uso de elementos reflectivos.

Basados en lo anterior, fue necesario definir las distancias y dimensiones límites para ubicar los elementos ópticos, de modo que no superaran los establecidos en las especificaciones iniciales del sistema. Esto permitió establecer un diseño básico inicial, a partir del cual se trabajaron y evaluaron una variedad de diseños.

Para garantizar que el primer elemento tuviera una obstrucción superficial menor a 16% , éste se ubicó a 3.5 metros del espejo primario del telescopio y con un diámetro de 38cm, el cual representa una obstrucción del 14%. Con la idea de minimizar el número de elementos ópticos y la longitud total del sistema correctivo, se estableció que los primeros elementos iban a ser un par de espejos con curvaturas opuestas. Una de las características del corrector de foco primario era que debía ser afocal, entonces las curvaturas de estos espejos no debían modificar la distancia focal original de 5 metros. Para lograr

esto, se tomó la configuración de $f/5 - f/2 - f/5$, en ésta, como se muestra en la figura 3.1, se calcula el nuevo punto focal que se generaría con un espejo secundario para una relación focal $f/2$, y justo en la intersección de este nuevo cono de luz y el de sombra del espejo secundario, se calculó la posición del espejo terciario. Éste último con una curvatura tal que restablecía la razón focal del telescopio a su $f/5$ original y un diámetro que le permitía captar los rayos inclinados hasta 0.5 grados provenientes del espejo secundario, en este caso, de 16cm. Para que los rayos provenientes del espejo terciario no fueran reflejados nuevamente por el secundario y pudieran llegar al punto focal calculado, fue necesario incorporar una abertura central de 6cm de radio en el espejo secundario. Como el sistema de corrección debe ser afocal, las curvaturas y posiciones de estos elementos reflectivos no pueden ser modificadas. Así que aunque éstos tienen la ventaja de compactar las dimensiones del corrector, dejan sólo las dos excentricidades de los espejos como variables libres para disminuir las aberraciones.

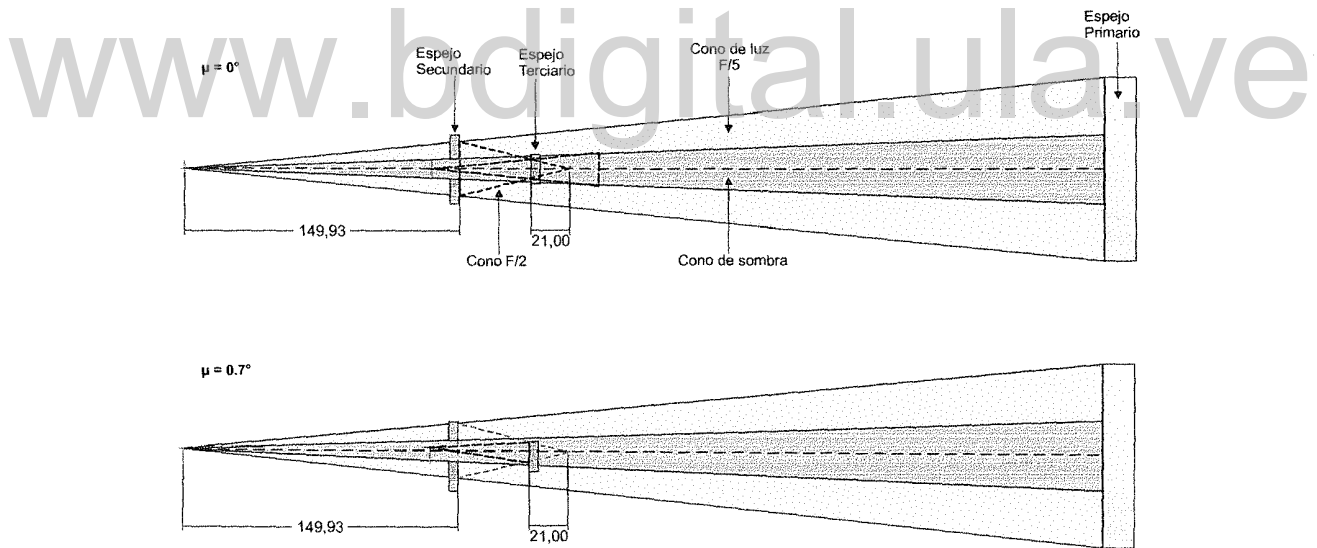


Figura 3.1: Esquema de la disposición de los espejos y su camino óptico para rayos axiales ($\mu = 0^\circ$) y para rayos a 0.7 grados del eje ($\mu = 0.7^\circ$). Dimensiones en centímetros.

Es importante destacar que la distorsión no será tratada con este corrector, ya que no modifica la calidad de la imagen y su efecto puede ser corregido o compensado adecuadamente con el tratamiento digital de las imágenes. Igualmente, en el caso de que el sistema requiriera la utilización de elementos refractivos, se tolerará la aberración cromática hasta una diferencia de décimas de milímetro en sus focos monocromáticos². Estas consideraciones nos dejan como objetivos de minimización: la aberración esférica, coma, astigmatismo y la curvatura de campo. Así que en adelante cuando se hable de *las aberraciones*, se estará haciendo mención sólo a las cuatro anteriores.

Generalmente, cuando se diseñan sistemas correctivos, es posible emplear al menos un elemento óptico por cada aberración que se desee corregir. Sin embargo, antes de pensar en los siguientes elementos que podrían componer al corrector, se hizo un análisis para ver cómo variaban las aberraciones en función de las excentricidades de los espejos secundarios y terciarios. Para esto, usando la herramienta de cálculo de los coeficientes de Seidel de Zemax[®], se analizaron cada uno de los 441 casos para las excentricidades de los dos espejos comprendidas entre [-10 ; 10], con variaciones de 1.0.

En la figura 3.2 se muestra el mosaico de resultados de cada aberración, pudiendo destacar que la única que no presentó variaciones en su comportamiento fue la curvatura de campo. Esto se debe principalmente a que las curvaturas de ambos espejos permanecieron constantes, a pesar de la variación de sus excentricidades. Igualmente, para las demás aberraciones se puede apreciar una clara tendencia lineal en la ubicación de pares de excentricidades que generan sus valores mínimos. Para poder analizar estas tendencias simultáneamente, se calcularon las ecuaciones de estas rectas y se combinaron en el gráfico 3.3, y a partir de él se puede ver que no existe un punto de triple coincidencia entre ellas. En otras palabras, no hay una configuración con dos espejos que minimice conjuntamente todas las aberraciones, reafirmando en este caso, que con dos elementos sólo se pueden controlar dos aberraciones.

²Se tomó la decisión de aceptar esta condición debido a que la mayoría de las observaciones en este telescopio se realizan con filtros con ancho de banda de ≈ 100 nm

3.1 Definición del diseño óptico

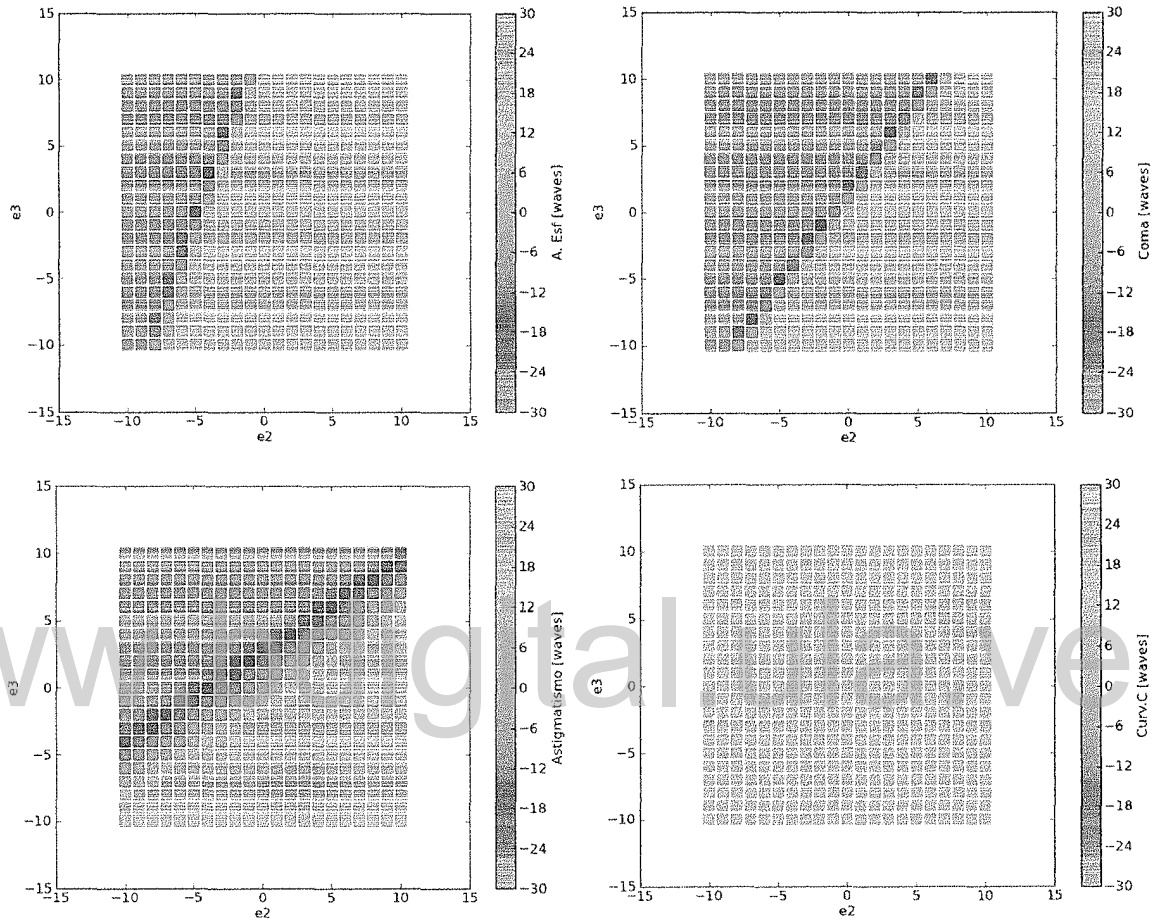


Figura 3.2: Variación de las aberraciones respecto a las excentricidades de los espejos secundario y terciario.

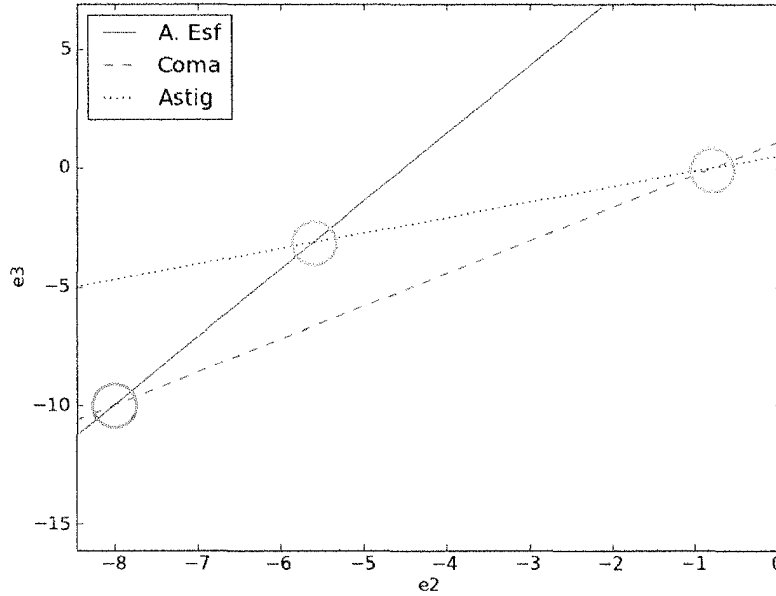


Figura 3.3: Rectas de aberración mínima según las excentricidades de los espejos secundario y terciario. Los círculos resaltan los puntos de intersección de las rectas. El círculo naranja muestra el par de excentricidades escogido para minimizar la aberración esférica y el coma.

A partir de este punto, se asume la necesidad de implementar al menos dos elementos ópticos adicionales que incorporen al sistema suficientes parámetros libres que permitan minimizar las aberraciones restantes. Debido a que ya no era viable colocar más espejos en el reducido camino óptico restante, se decidió escoger a partir del gráfico 3.3, la configuración de espejos con excentricidades de -8 y -10, la cual disminuye en conjunto la aberración esférica y el coma (son las que proporcionalmente, están presentes en mayor cantidad). Posteriormente se procedió a incorporar al diseño un par de lentes, a pesar de que esto implicaba generar cuatro nuevas superficies y lidiar forzosamente con la aberración cromática que introducen.

Estos dos lentes, se elaborarían con un vidrio tipo UBK7 por su buena transmitancia en todo el rango espectral deseado y estarían dispuestas entre el espejo terciario y el foco del telescopio. Las lentes deben tener *potencias o*

*dioptrias*³ que se contrarresten entre sí para que no modifiquen la distancia focal final del telescopio. A pesar de la restricción, se genera una familia de posibles pares de dioptrías, a su vez dependientes de la distancia entre las lentes, que cumplen con la condición de ser afocales en conjunto. Aparte de esto, también se cuenta con la otra familia de lentes generadas por el *bending* de sus superficies. Todo lo anterior incrementa los parámetros libres del sistema, superando en número a las aberraciones, que son las variables a minimizar. Aunque en teoría esto debería garantizar la obtención de al menos un sistema cuyos valores de aberraciones sean simultáneamente cercanos a cero, debido a la complejidad de tener un espejo primario esférico y lo amplio del campo⁴ que se desea obtener, existía la posibilidad de que dicho sistema no fuera encontrado.

Tal como se señalaba anteriormente, la distancia entre las lentes es un parámetro libre, sin embargo, esto es válido dentro de cierto rango porque la aberración cromática que introducen aumenta junto con dicha separación, pero el doblete pierde eficiencia en la corrección de la curvatura de campo a medida que las lentes están más cerca entre sí. Empíricamente se estableció que la distancia entre ellas sería de 4 cm. Una vez conocido ese valor, se calculó mediante la siguiente ecuación, la dioptría que debían tener ambas lentes para mantenerse afocales

$$D_2 = \frac{-D_1}{1 - D_1 \cdot \text{sep}} \quad (3.1)$$

Luego, se hizo el estudio para ver cómo variaba la curvatura de campo del sistema con respecto a un cambio porcentual en la dioptría de la primera lente. A partir de la figura 3.4 se muestra que sigue una tendencia lineal, y que de ella era posible determinar el porcentaje de incremento de la dioptría necesario para conseguir anular la curvatura de campo.

Se hizo la simulación con la nueva dioptría calculada en -2.45 y se encontró que el valor del coeficiente de Seidel referente a la curvatura de campo era prácticamente nulo. En este punto ya se había logrado controlar, según la aproximación de Seidel, la aberración esférica, el coma y la curvatura de campo del sistema, sólo restaba controlar el astigmatismo residual. Con las

³Entiéndase por dioptría a la unidad que mide la capacidad de una lente para desviar los rayos de luz. Esta unidad es recíproca a la longitud focal (en metros) de la lente.

⁴Amplio respecto al campo original del telescopio

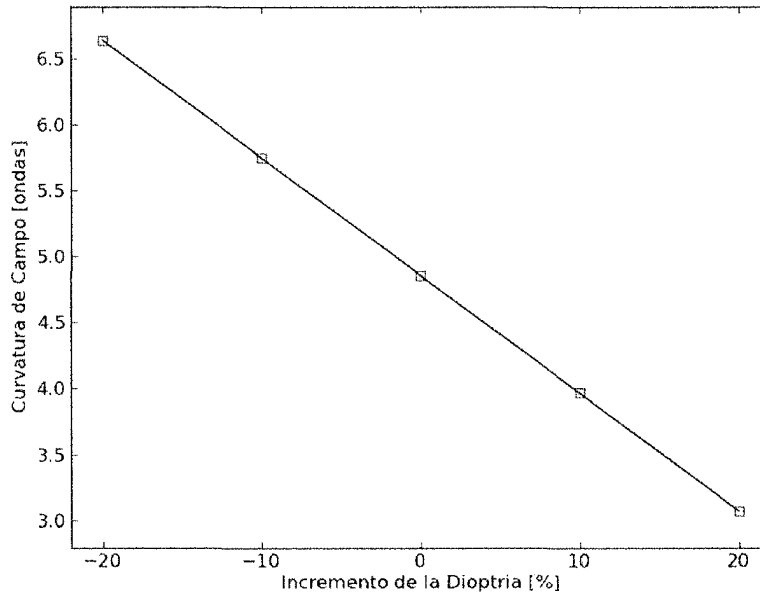


Figura 3.4: Variación de la curvatura de campo respecto a la dioptría

nuevas curvaturas de las lentes, se hizo un estudio para determinar si el valor de la curvatura de campo presentaba alguna variación en el caso de aplicarle *bending* a cualquiera de las lentes. El resultado de la prueba fue que el campo se mantuvo plano, pero se afectaban las demás aberraciones. A pesar de este último resultado, no se descartó el uso del *bending* como herramienta para modular la cantidad de las otras aberraciones residuales.

3.2. Análisis multivariable

Las pruebas intuitivas, si se realizan con los argumentos correctos, pueden ser útiles para encontrar las soluciones deseadas. Sin embargo, cuando se tienen tantas variables y argumentos de las cuales dependen, llega un momento en que es necesario replantear la metodología de prueba, de modo que el trabajo se haga más eficiente, en especial cuando se cree que puede haber más de una configuración solución. El sistema que se había obtenido, en el que se

lograba minimizar tres de las cuatro aberraciones, representó la motivación principal para buscar una mejor forma de variar los parámetros del sistema para conseguir la solución requerida. Esto debido a que al usar el recurso del *bending* variaban todos los demás parámetros, lo cual implicaba tener que cambiar nuevamente las excentricidades de los espejos y posiblemente las dioptrías de las lentes de forma iterativa, sin la seguridad de llegar a una solución. Es así como se decide empezar a realizar un análisis multivariable del sistema. Este tipo de análisis se refiere a un conjunto de pruebas con variaciones sistemáticas de cada una de las variables en los rangos permitidos, donde se estudian los cambios finales del sistema en función de las contribuciones de cada una de ellas.

En este trabajo se aplicó el análisis multivariable siguiendo un método *ad hoc*. En las aproximaciones de Seidel, los valores de las aberraciones del sistema son el resultado de la suma algebraica de las aberraciones que se generan por cada una de las superficies que componen el sistema óptico. Poder obtener estos valores de forma individual y en conjunto, fue la clave para llevar a cabo el análisis multivariable, porque conociendo, cualitativa y cuantitativamente, la forma en la que variaban las aberraciones en función de las excentricidades de los espejos y haciendo el mismo estudio riguroso para el caso del *bending* de las lentes, era posible unir ambos comportamientos y simular numéricamente todos los demás sistemas posibles dentro de los rangos de variación establecidos.

Se utilizó Zemax[®] como única herramienta de simulación de los sistemas ópticos y su paquete de cálculo de los coeficientes de Seidel para obtener los valores de cada una de sus superficies y los valores totales de aberraciones del corrector. Los resultados del estudio por superficies se dividieron en dos grupos, el primero con los resultados del conjunto de elementos reflectivos y el segundo con el de los refractivos. En este último estudio, se ampliaron los rangos de excentricidades de los espejos secundario y terciario a [-15 ; 15] con variaciones de 0.5, y los valores del Factor de Forma de Coddington (SF por sus siglas en inglés) de las lentes a [-2.43 ; 2.43], de modo que se probaran lentes positivas y negativas. Luego, la simulación del comportamiento de las aberraciones, en toda la gama de posibles sistemas resultantes por la combinación de todos los parámetros libres, se realizó mediante herramientas numéricas en el lenguaje de programación Python.

El resultado de la simulación fueron más de 3 millones de sistemas diferentes. Encontrar la forma de representar simultáneamente todos esos valores obtenidos respecto a los parámetros variados, fue objeto de discusión y análisis durante el trabajo, porque para lograrlo se requería hacer una proyección de un sistema de al menos cinco dimensiones a uno tridimensional. Sin embargo, más allá de encontrar una representación gráfica para ver si seguían alguna tendencia, se decidió concentrarse sólo en la ubicación de los *posibles sistemas solución*. Para esto, se implementaron diversas máscaras para buscar sistemas con valores de coeficientes cuasi-nulos, simultáneos en todas las aberraciones.

Del gran número inicial, sólo once conformaron el grupo de posibles sistemas solución. Cada uno de los miembros de este grupo fue sometido a la simulación numérica rigurosa para evaluar la calidad de imágenes que generaban, con la finalidad de poder hacer una selección de los que tuvieran mejor desempeño y en lo posible, producto del contraste entre ellos, definir el sistema solución.

3.3. Análisis iterativo

La simulación o el análisis numérico riguroso es el proceso más cercano al de una prueba experimental en el que se pueden plantear todos los posibles escenarios y ver la respuesta del sistema simulado, de una manera relativamente sencilla sin tener que invertir tiempo en manufactura, obteniendo resultados muy cercanos a los experimentales. Al momento de realizar la simulación se tomaron en cuenta los cuatro parámetros que caracterizaban a cada sistema de la lista (las excentricidades de los espejos secundario y terciario junto con las curvaturas de las superficies de las lentes, representadas para el análisis por medio de su Factor de Forma de Coddington). Durante el proceso, se observó que el valor de la longitud focal total no era constante para todos los sistemas, pero sus variaciones no representaban más del 2% del valor inicial. Igualmente, se contrastaron los coeficientes de Seidel generados por la simulación con los esperados del análisis multivariable, encontrando total coincidencia entre ellos. Sin embargo, al evaluar las imágenes generadas por estos sistemas, fue inesperado encontrar que en la mayoría de los casos no cumplían con la calidad mínima requerida. Un ejemplo de esto se muestra en la figura 3.5 donde el diagrama de puntos para cada uno de los campos extra-axiales analizados, tiene imágenes mayores a los 3 segundos de arco,

mientras que los coeficientes de Seidel tenían valores menores a 4 ondas por aberración.

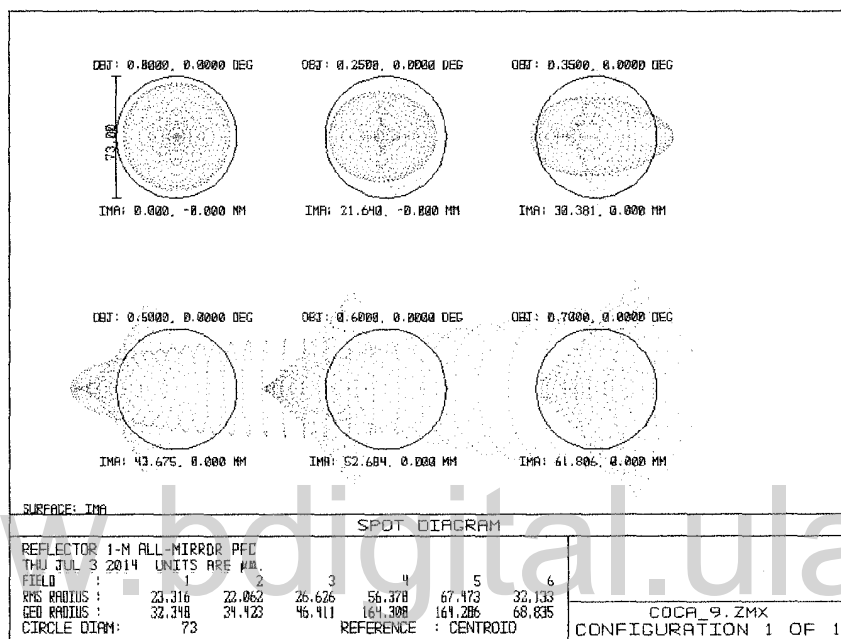


Figura 3.5: Diagrama de puntos de uno de los sistemas probados. El círculo de referencia tiene $73\mu\text{m}$ de diámetro que representa 3 segundos de arco.

Lo inesperado con estos resultados es la aparente desconexión entre el diámetro promedio de las imágenes del sistema y los bajos valores de los coeficientes de Seidel. Por definición estos coeficientes son la representación cuantitativa de las aberraciones, así que en teoría lograr de manera simultánea valores tan pequeños en casi todas las aberraciones de punto, para rayos inclinados hasta 0.7° , debía traducirse en tener las mejores imágenes a lo largo de todo el campo visual.

Llegar a este punto en el trabajo fue determinante para analizar a fondo lo que se había hecho hasta el momento, conocer las limitaciones de la teoría sobre la que se estaba basando el trabajo, así como replantear los procedimientos a seguir. Aunque se había hecho un estudio bibliográfico previo, la

forma como Zemax[®] calcula los valores de los coeficientes de Seidel no es del todo clara, en especial porque en las ecuaciones que dicen utilizar no aparece explícitamente el término referente a la excentricidad de la superficie. Para los últimos once sistemas probados, las excentricidades de los espejos oscilaban entre [-14.5 ; -8.5], estos valores son las de hipérbolas bastante pronunciadas para el estándar de superficies ópticas, lo que hace pensar que para objetos cuyo perfil difiera mucho del de una esfera, las aproximaciones de Seidel dejan de ser adecuadas. Por otro lado, la forma como la herramienta de Zemax[®] calcula los radios locales de superficies muy excéntricas puede que no sea la más apropiada. Cualquiera de las hipótesis anteriores podría explicar la diferencia entre los valores obtenidos y los diagramas de punto generados. Sin embargo, no había forma de solventar dicha diferencia, así que los sistemas con coeficientes de Seidel cuasi-nulos se convirtieron en un nuevo punto de partida, como una referencia aproximada en la búsqueda del sistema solución. Esto significa que había que aplicarle a los *posibles sistemas solución* un ensayo numérico riguroso de forma manual para ver si modificando convenientemente algunos parámetros del sistema se podían obtener mejores imágenes en todo el campo.

A partir de los diagramas de puntos, también se pudo notar que a pesar de tener un campo plano, las imágenes no tenían su mejor foco sobre toda su superficie. Haciendo un análisis a la curvatura de campo del sistema, (figura 3.6) se encontró que no era una superficie focal curva habitual, lo que permitía considerar a la curvatura de campo como un nuevo parámetro libre para obtener una superficie focal que generara las mejores imágenes.

Con el tiempo, luego de ver numerosos diagramas de puntos con diversas mezclas de aberraciones, es posible identificar la presencia de ellas y clasificarlas parcialmente según su magnitud. Para poder aprovechar esto, es necesario saber cuáles parámetros libres modificar y cómo afectaría dicho cambio a las demás aberraciones, de modo que se logre minimizar a las que estén en mayor proporción, generando mayor equilibrio de ellas en el sistema. Tomando uno de los once sistemas encontrados y usando sus valores de aberraciones como referencia, se hizo una variación porcentual sistemática de cada uno de los parámetros libres (excentricidad del secundario, excentricidad del terciario, *bending* lente 1, *bending* lente 2 y la dioptría de la lente 1), para conocer cuáles de ellos son los más influyentes en el cambio de comportamiento de las aberraciones.

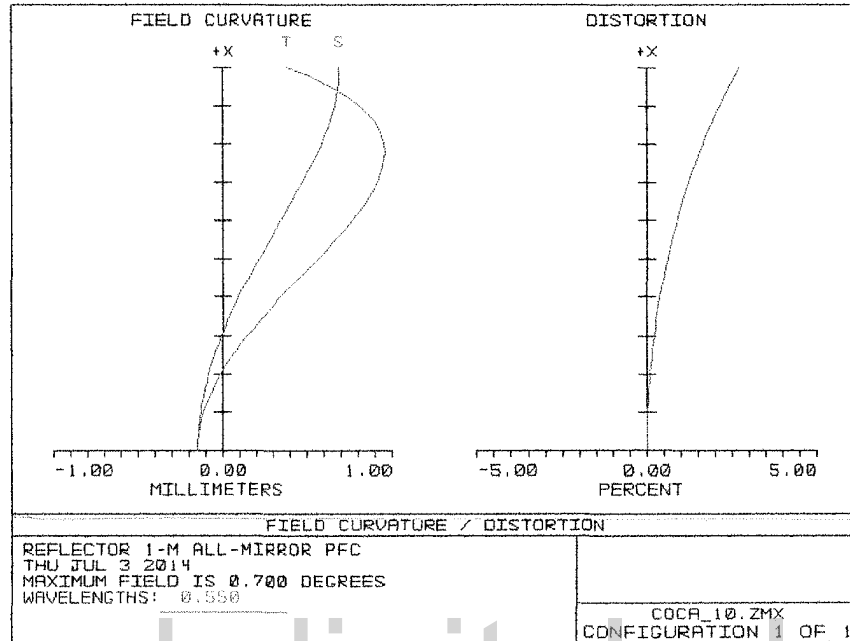


Figura 3.6: Comportamiento de la Curvatura de Campo y la Distorsión de uno de los sistemas probados. En estos gráficos $+x$ representa la distancia al centro óptico medida en grados mientras que T y S muestran el comportamiento de la curvatura de campo en los planos tangencial y sagital respectivamente.

En los gráficos de las figuras 3.7 a la 3.10, $Ec2$ y $Ec3$ son las excentricidades de los espejos secundario y terciario respectivamente, $SF1$ y $SF2$ los factores de forma de las lentes del doblete y $D1$ la dioptría de la primera lente. En el eje horizontal se muestra el cambio porcentual de estos parámetros y en el eje vertical la variación en la cantidad de aberración presente producto del mencionado cambio.

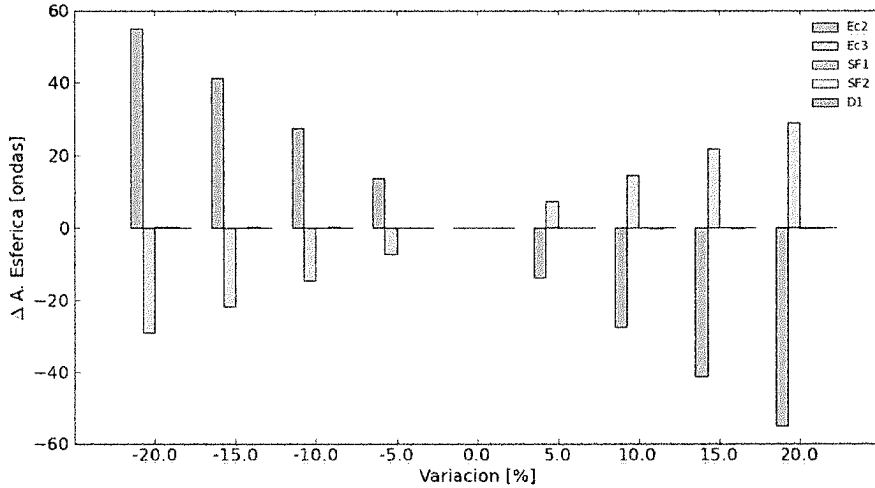


Figura 3.7: Variación de la aberración esférica en función de los parámetros libres. En éste y los siguientes gráficos, los colores de las barras corresponden a los parámetros libres que se variaron.

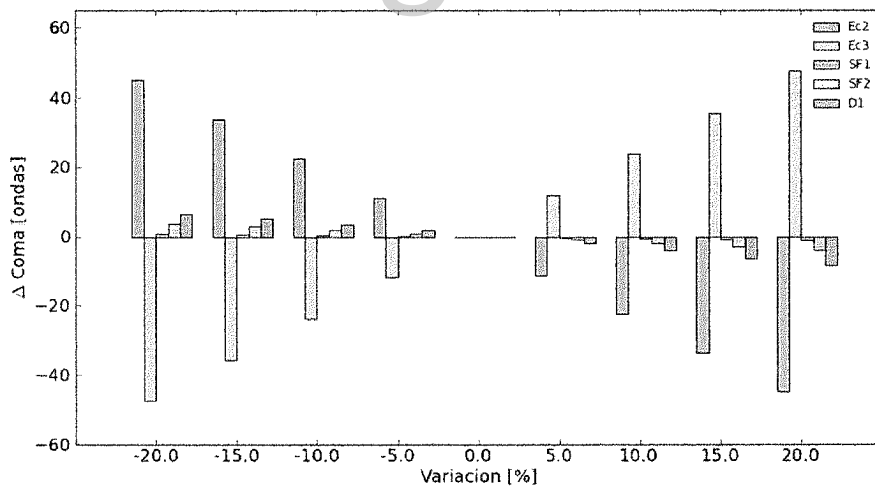


Figura 3.8: Variación del coma en función de los parámetros libres

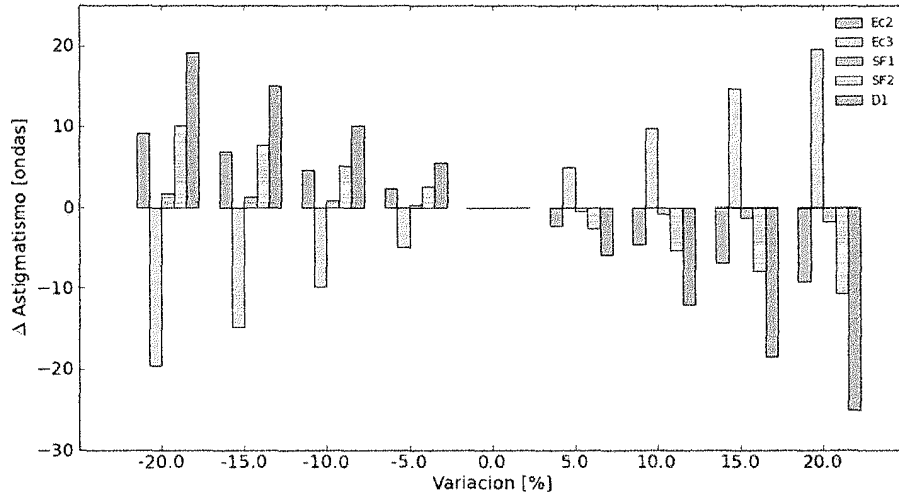


Figura 3.9: Variación del astigmatismo en función de los parámetros libres

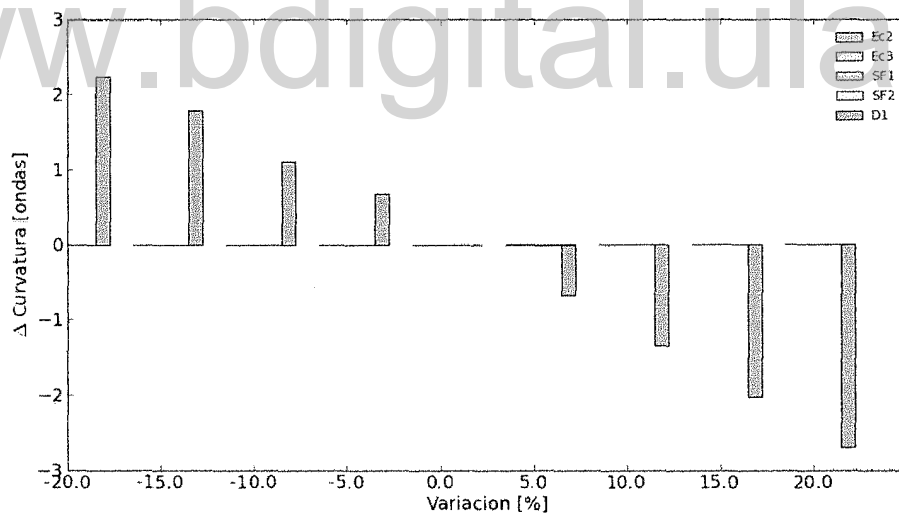


Figura 3.10: Variación de la curvatura de campo en función de los parámetros libres

A partir de estos cuatro gráficos, se deduce que las excentricidades de los espejos secundario y terciario son los que básicamente modifican la cantidad de aberración esférica y coma del sistema. En el caso del astigmatismo, aunque la dioptría de la primera lente junto con la excentricidad del terciario son los más influyentes, los demás parámetros contribuyen significativamente en la cantidad final de esta aberración. Por último, se aprecia que la curvatura de campo únicamente depende de las variaciones de la dioptría de la primera lente.

En resumen, se pudo conocer de forma más detallada la capacidad de cambio que tienen cada uno de los parámetros libres. Estas tendencias representaron el nuevo conjunto de recursos factibles para iniciar un nuevo proceso de búsqueda con *iteraciones manuales*, en el que se variaron los parámetros en función de las aberraciones presentes en los diagramas de puntos.

www.bdigital.ula.ve

4

Resultados

Como siguiente paso a seguir en el desarrollo de este trabajo, se presentarán los resultados obtenidos siguiendo el procedimiento experimental y las estrategias planteadas en el capítulo anterior. Se mostrarán los sistemas optimizados mediante la variación de parámetros por iteraciones manuales, cómo se relacionan estos sistemas con los esperados con las aproximaciones de tercer orden de Seidel y la calidad de imágenes generadas por ellos. Por último, se expondrán los argumentos y procedimientos usados para seleccionar el sistema sugerido como *solución*.

4.1. Relación entre los sistemas obtenidos del análisis multivariable y la Simulación Numérica Rigurosa

El proceso de pruebas mediante iteraciones manuales fue uno de los más largos del trabajo. A pesar de contar con los diversos parámetros libres (excentricidad del secundario, excentricidad del terciario, *bending* lente 1, *bending* lente 2 y la dioptría de la lente 1) y conocer el efecto de ellos en cada una de las aberraciones, lograr disminuirlas balanceadamente no fue un procedimiento predecible ni directo. Como se debían probar todas las posibilidades, se tomó la decisión de continuar modificando manualmente los sistemas encontrados mediante las aproximaciones de Seidel a pesar del riesgo de no encontrar alguno que cumpliera con todos los parámetros y especificaciones

propuestos en este trabajo.

Afortunadamente, las pruebas arrojaron más de un sistema con imágenes progresivamente mejores a la de sus sistemas iniciales pero aún con diámetros justo en los valores típicos de *seeing* promedio del Observatorio Astronómico Nacional. Según el trabajo realizado por Herrera en el 2000 [8], el valor de la turbulencia atmosférica estaba alrededor de los 2 segundos de arco. Esto significa que para asegurar que la calidad de la imagen generada por el telescopio no sea degenerada por las aberraciones residuales del corrector de foco primario diseñado, el diámetro de las imágenes debe estar en todo el campo deseado por debajo de ese valor de *seeing* reportado.

Paralelo a estas pruebas iterativas, se inició un nuevo ciclo de simulaciones teóricas para comprobar la existencia de una relación entre los sistemas basados en las aproximaciones de tercer orden de Seidel con rayos inclinados 0.7° , con respecto a los inclinados a 0.5° . En estas simulaciones teóricas, los rangos anteriormente establecidos para los parámetros libres permanecieron iguales, cambiando únicamente el valor de la inclinación de los rayos incidentes. Realizando el mismo procedimiento de análisis multivariable y la selección por máscaras de los sistemas con valores mínimos simultáneos de los coeficientes de Seidel, se encontraron junto a cuatro sistemas adicionales, los otros once hallados usando los rayos inclinados a 0.7° . Como ha de esperarse, se simularon rigurosamente estos sistemas adicionales pero al igual que en todos los casos anteriores, las imágenes no eran suficientemente buenas por sí mismas, así que se les aplicó el mismo proceso de iteraciones manuales con el fin de mejorar los resultados.

Durante el proceso se notó que entre los sistemas probados variaban los diámetros de sus imágenes pero las formas según los diagramas de puntos eran muy similares. Lo curioso es que esto pasaba aun cuando en los sistemas, las lentes podían ser por ejemplo, positivas o negativas y con diferentes dioptrías (generalmente estos parámetros cambian la forma de las imágenes). Es importante señalar que en algunos de los sistemas probados no se lograron obtener disminuciones considerables en los diámetros de sus imágenes, así que iban siendo descartados de la lista inicial. Por otro lado, hubo sistemas en los que se pudo conseguir más de una configuración con buenos resultados producto de la variación de los parámetros libres.

4.1 Relación entre los sistemas obtenidos del análisis multivariable y la Simulación Numérica Rigurosa

A medida que se avanzaba con las pruebas, crecía la necesidad de representar de forma lógica y organizada los sistemas encontrados que generaban imágenes aceptables. El principal problema era como ordenarlos, ya que entre ellos no había una secuencia natural. Entonces surgió la idea de utilizar el valor del Factor de Forma de Coddington de la primera lente del doblete como etiqueta, ya que en este caso no era un parámetro repetido y era característico de cada sistema. Luego, como la etiqueta era numérica, se podían relacionar respecto a ella los valores de los demás parámetros libres. El resultado de las relaciones se encuentra en el gráfico de la figura 4.1.

En dicho gráfico se ajustaron a las series de datos de las iteraciones manuales una curva de tendencia potencial. El comportamiento de los parámetros libres en los sistemas generados por trazado de rayos riguroso es similar al de los sistemas producto del análisis multivariable. Los valores que más se alejaron a los esperados por la aproximación de Seidel fueron los de las excentricidades de los espejos secundario y terciario. Ambos parámetros representaban los recursos más fuertes, así como la dioptría en el caso de la curvatura de campo, para variar la cantidad de las demás aberraciones en el sistema.

La aproximación de tercer orden de Seidel en este caso estudiado, sirvió para proporcionar los valores cercanos a los parámetros generadores de sistemas que cumplieran con la calidad de imagen requerida. Es decir, ayudó a orientar la búsqueda para llegar rápidamente a los primeros sistemas, los cuales posteriormente, con las iteraciones manuales, mejoraron su desempeño óptico. Los coeficientes de Seidel actuaron como guía para poder descartar rápidamente los demás sistemas cuyas configuraciones no generarían resultados aceptables.

Las ecuaciones de las curvas de tendencia fueron la base para iniciar un último ciclo de pruebas. Se tomaron sistemas que estuvieran dentro del rango de las abscisas y por medio de las ecuaciones que describían las tendencias, era posible encontrar todos los demás parámetros que definían los elementos del sistema. Este proceso no fue temporalmente tan extenso como los otros, porque los sistemas encontrados requirieron de menos ajustes que los generados por el análisis multivariable.

En el gráfico 4.2 se muestran las series de datos de los sistemas encontrados por el último método mencionado junto con los de las iteraciones manuales. Para poder considerar como apto a un posible sistema solución, los diáme-

4.1 Relación entre los sistemas obtenidos del análisis multivariable y la Simulación Numérica Rigurosa

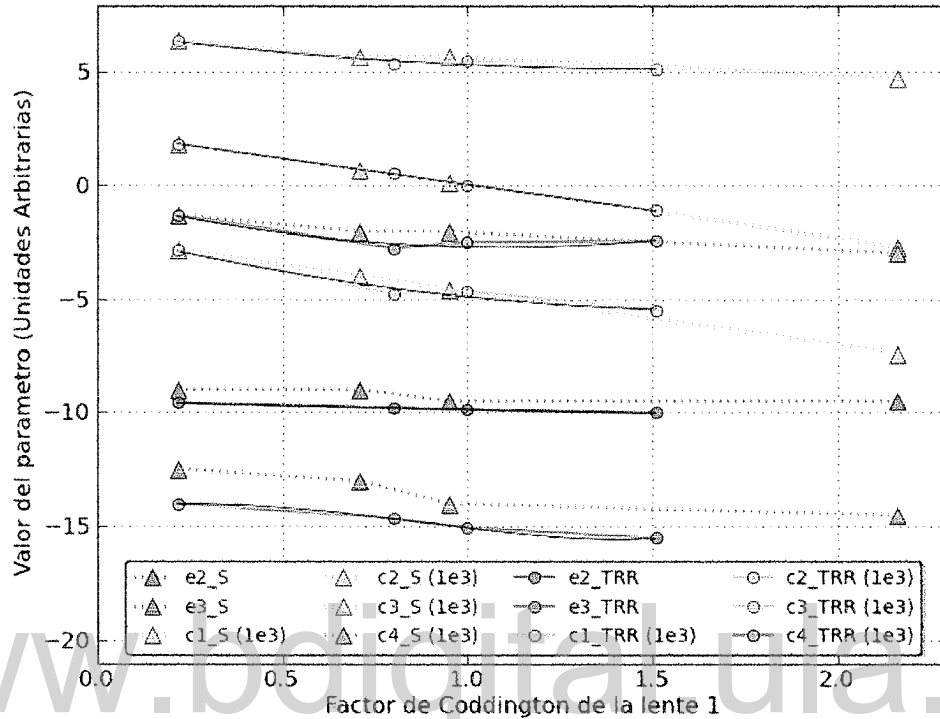


Figura 4.1: Relación entre los sistemas encontrados por las iteraciones manuales (círculos unidos mediante líneas sólidas y etiquetados con el subíndice *TRR* debido a que fueron generados por trazado de rayos riguroso), y los sistemas seleccionados del análisis multivariable (triángulos unidos por líneas punteadas y etiquetados con el subíndice *S* debido a que fueron obtenidos por la aproximación de Seidel). Las curvas sólidas negras representan el ajuste por mínimos cuadrados (hasta 3er grado) de las series de datos producto del trazado de rayos riguroso. Los datos de las series graficadas tienen diferentes unidades y escalas entre sí (los factores de escala están entre paréntesis), por lo que el eje de las ordenadas tiene unidades arbitrarias.

tros de las imágenes generadas por rayos cercanos al centro del campo deben tener como máximo segundo y medio de arco. Valores mayores al anterior estarían asociados principalmente a una cantidad intolerable de aberración esférica en el sistema.

4.1 Relación entre los sistemas obtenidos del análisis multivariable y la Simulación Numérica Rigurosa

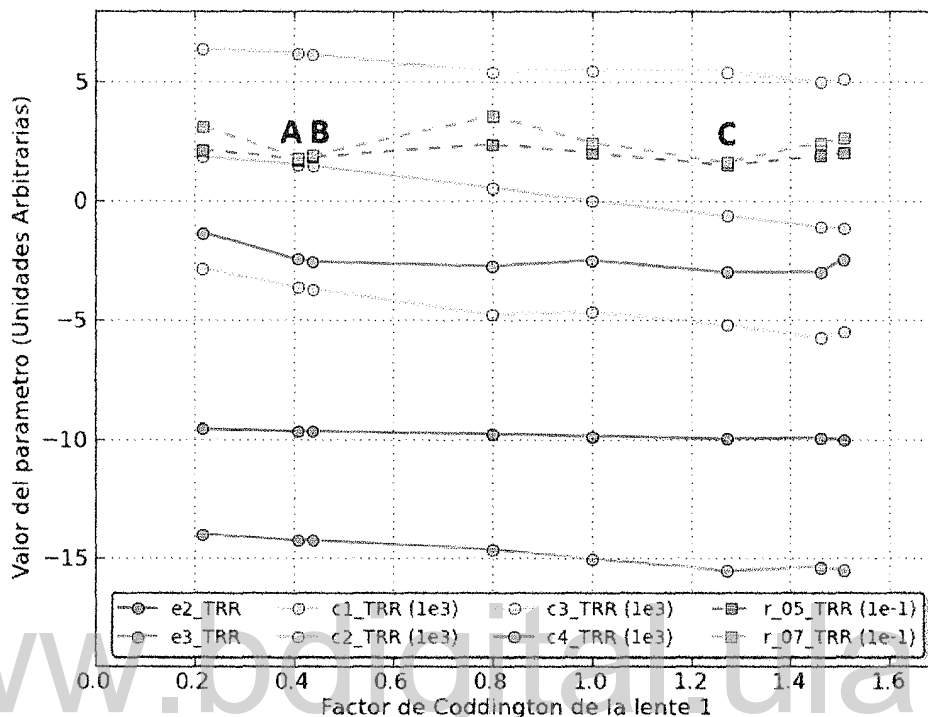


Figura 4.2: Representación de los parámetros de los sistemas simulados con trazado de rayos riguroso. Los datos unidos con líneas segmentadas y marcadores cuadrados corresponden a los radios de las imágenes que contienen el 80% de la energía encerrada a 0.5° y 0.7° de campo, inclinaciones que coinciden respectivamente con la posición en el borde y en la esquina del campo deseado. Los datos de las series graficadas tienen diferentes unidades y escalas entre sí (los factores de escala están entre paréntesis), por lo que el eje de las ordenadas tiene unidades arbitrarias. La explicación de las etiquetas A, B y C en el gráfico está en la sección 4.2.

En los sistemas representados en la figura 4.2, los radios de las imágenes que contienen el 80% de la energía encerrada en el borde y en la esquina del campo están entre ~ 14 y 35 micrómetros, lo que corresponden a diámetros de 1.2 y 3 segundos de arco respectivamente. Todas las series de datos de la figura 4.2, en conjunto permiten tener una mejor perspectiva del tipo de

sistema óptico y su desempeño en los puntos extremos del campo. Lograr esta agrupación de información fue de gran utilidad para poder llevar a cabo el proceso de comparación entre los posibles sistemas solución, el cual será explicado en la siguiente sección como parte del proceso de selección del sistema definitivo.

4.2. Selección del sistema definitivo

Los sistemas encontrados por las ecuaciones de tendencia de sus parámetros libres, generaban imágenes progresivamente mejores pero con un paso evolutivo muy corto. Así que para no extender excesivamente el proceso de búsqueda, se decidió con base en las series de datos del gráfico de la figura 4.2, que los sistemas de esa lista que tuvieran imágenes con diámetros similares para los diferentes campos y que simultáneamente fueran valores mínimos en las series relacionadas con el desempeño óptico, se les aplicarían los diferentes procesos de análisis para ver si alguno de ellos podría ser el sistema solución. Los seleccionados fueron tres y tenían en la primera lente un Factor de Forma de Coddington 0.409, 0.440 y 1.273 respectivamente. Otra consideración que se tomó para detener en este punto la búsqueda de otros posibles sistemas solución, fue que estos tres sistemas que generaban imágenes menores a los 2 segundos de arco tanto el borde como en el extremo del campo objetivo, representaban una cantidad suficiente para hacer un análisis comparativo. A continuación se mostrarán los resultados de los diferentes procesos de análisis a los que fueron sometidos los sistemas seleccionados. Para simplificar la referencia, los sistemas con Factor de Forma de Coddington 0.409, 0.440 y 1.273 serán nombrados en adelante como *A*, *B* y *C* respectivamente.

4.2.1. Análisis del desempeño óptico de los sistemas

Los tres sistemas seleccionados están representados con los puntos de menor valor en las series de datos correspondientes a los diámetros de las imágenes que contienen el 80 % de la energía encerrada tanto en el borde como en la esquina del campo. Según los gráficos, los valores de sus parámetros se ajustan a las tendencias de los sistemas encontrados por el análisis multivariable. En la siguiente tabla se muestran para los puntos extremos del

campo (0.5° y 0.7°), los valores de los radios RMS¹ y los radios con el 80 % de la energía encerrada para cada uno de los sistemas para $\lambda = 550\text{nm}$.

Sistema	Radio	0.5°	0.7°
A	RMS [μm]	16.72	15.00
	RMS ["]	0.69	0.62
	80 % energía encerrada [μm]	18.20	18.90
	80 % energía encerrada ["]	0.75	0.78
B	RMS [μm]	15.89	14.27
	RMS ["]	0.66	0.59
	80 % energía encerrada [μm]	17.40	18.00
	80 % energía encerrada ["]	0.72	0.74
C	RMS [μm]	15.64	13.47
	RMS ["]	0.64	0.55
	80 % energía encerrada [μm]	14.82	16.01
	80 % energía encerrada ["]	0.61	0.66

Como se puede apreciar, de los tres, el sistema *C* es el que presenta los mejores valores de radios RMS y de energía encerrada, tanto en el borde como en el extremo del campo. Estos radios RMS aunque son un poco mayores a los establecidos en los requerimientos, siguen siendo suficientemente menores que las imágenes degradadas por la turbulencia atmosférica típica en el OAN. Por este motivo se siguen considerando estos sistemas como posibles soluciones aceptables.

Respecto a la relación entre la calidad de las imágenes (por sus diámetros) y los coeficientes de Seidel, se tiene a partir de la siguiente tabla, que el sistema *C* es el que tiene menor diferencia entre los valores de sus coeficientes para los dos ángulos estudiados y que sistemáticamente, tiene los menores valores para las aberraciones extra-axiales. A excepción del coeficiente de la aberración esférica, los otros valores en todos los sistemas son considerablemente superiores a cero, pero igual se mantiene la coincidencia de que el sistema *C* fue el que tuvo los menores valores totales entre sus coeficientes de Seidel y

¹Se refiere a la raíz cuadrática media de la posición de los rayos respecto al centro de la imagen.

también el que tuvo los menores diámetros en los extremos del campo.

Sistema	Ángulo	S_I [Ondas]	S_{II} [Ondas]	S_{III} [Ondas]	S_{IV} [Ondas]
A	0.5°	-1.159	9.634	8.112	3.981
	0.7°	-1.159	13.488	15.899	7.803
B	0.5°	-2.005	8.760	8.572	3.266
	0.7°	-2.005	12.265	16.801	6.402
C	0.5°	-1.755	7.538	7.562	3.138
	0.7°	-1.755	10.553	14.822	6.151

Un factor importante a considerar en el desempeño óptico de un sistema es el efecto de *viñeteado*, que se refiere a la reducción del brillo en la imagen en la periferia respecto al brillo en su parte central. Los tres sistemas en el borde del campo muestran una reducción del 14 % del brillo (lo que implica una pérdida en magnitud aproximada de 0.1) producto de este efecto, lo cual se estima como un valor muy aceptable. Sin embargo, en la esquina extrema del campo útil, este valor puede alcanzar 1 magnitud.

4.2.2. Análisis sobre el cumplimiento de las especificaciones y los requerimientos

- **Configuración original del telescopio**

Ninguno de los sistemas requirió la modificación total o parcial de alguno de los componentes ópticos que necesita el Telescopio Reflector para operar con la configuración $f/21$.

- **Rango espectral**

El rango espectral efectivo está comprendido entre 330 y 1000nm. Sin embargo, éste sólo se puede aprovechar en intervalos de ~ 100 nm que son en los que operan los filtros ópticos. Esta restricción se debe a que la aberración cromática residual del sistema degradaría la calidad de las imágenes para intervalos mayores, en especial en el UV.

- **Distancia focal y Escala**

Los valores de las distancias focales de los sistemas *A*, *B* y *C* fueron

de 5004.74, 5001.82 y 5003.59 mm respectivamente. En el mayor de los casos, que es el del sistema *A*, la diferencia de la distancia focal requerida es menor al 0.1% . Así que cualquiera de estos sistemas cumple con la condición de ser afocal. Como consecuencia de esto, se mantiene la escala del telescopio en su configuración $f/5$.

▪ **Requerimientos ambientales de diseño y operación**

Debido a las características del tipo de vidrio sugerido y al uso de espejos monolíticos, los elementos ópticos (que son de igual cantidad y tipo en los tres sistemas) se mantendrán estables frente a las condiciones ambientales en las que operarían.

▪ **Dimensiones límites**

La longitud promedio del camino óptico en los tres sistemas es de 3639mm, siendo el sistema *C* el que tiene la menor distancia con 3638.6mm. Esto significa que cualquiera de los sistemas sobresaldría por pocos centímetros del tubo del telescopio, cumpliendo así con la restricción en la longitud límite para la disposición de los elementos a lo largo del tubo.

Los tres sistemas, por definición, coinciden en una obstrucción superficial del 14% de la superficie del espejo primario del telescopio, siendo menor al 16% establecido. Igualmente, respecto a la distancia del último elemento del corrector al sensor, los tres sistemas tienen más de 88mm de separación, siendo el sistema *A* el que logra mayor distancia con 89.5 mm y superando, como cualquiera de los otros, los 80mm de separación mínima.

▪ **Modos de operación**

Cualquiera de los sistemas ópticos tiene una distribución de elementos que es factible de sujetar por medio de una estructura mecánica al tubo del telescopio. Dicha estructura se sugiere sea de fácil colocación y ajuste para que pueda hacerse el cambio de sistema $f/5$ a $f/21$ y viceversa con relativa rapidez.

Se puede decir que en general, los tres sistemas tienen respuestas similares entre sí, cumpliendo todos ellos con las especificaciones y requerimientos planteados.

4.2.3. Análisis sobre la factibilidad de construcción de los sistemas

Se dice que un sistema es factible de construir cuando los materiales que requiere son conocidos e igualmente cuando sus parámetros ópticos están dentro de los rangos de sensibilidad de control y verificación disponibles y tecnología de fabricación (ya sea fabricación propia o con una empresa especializada). Un sistema que incumpla con al menos alguno de los puntos anteriores se considera que es poco factible de construir.

Como los tres sistemas seleccionados utilizan el mismo tipo de vidrio para las lentes, éstas tienen espesores y curvaturas dentro de los rangos estándar de fabricación y las excentricidades de los espejos son muy similares, cualquiera de las lentes se podría generar con las tecnologías disponibles en la institución. Sin embargo, debido a las pronunciadas excentricidades que tienen los espejos de los sistemas seleccionados, el proceso de fabricación de los mismos representan un gran reto, en especial para las tecnologías nacionalmente disponibles. Es por esto que se sugiere pedir cotización a alguna empresa o institución extranjera con conocida trayectoria en fabricación de elementos ópticos de gran precisión, para la generación de estos espejos. Considerando todo lo anterior, se puede decir que ninguno de los tres sistemas seleccionados tiene una facilidad de construcción mayor respecto a los otros dos.

4.2.4. Selección del sistema solución

El hecho de tener al menos un sistema que cumpliera con una calidad aceptable de imágenes, con diámetros en los puntos extremos del campo menores a los generados por la turbulencia atmosférica típica del OAN, con las especificaciones y requerimientos planteados y que además fuera factible de construir, es un logro importante del proyecto. En este caso, se logró conseguir ocho sistemas que eran posibles soluciones y tres de ellos que cumplen con todo lo anteriormente descrito.

A partir del análisis comparativo realizado entre los tres sistemas seleccionados y con base en su rendimiento y desempeño, se determinó que **el sistema que se propone como solución es el sistema C.**

En función de los componentes ópticos del corrector, en particular por el uso de elementos refractores y reflectores, se propone bautizarlo con la abreviación **CorCat (Corrector Catadióptrico)**. Este diseño no sólo logra el objetivo principal de minimizar las aberraciones generadas por el primario esférico del Telescopio Reflector de 1m del OAN en toda la superficie del campo deseado, sino que representa una contribución importante a las estrategias de corrección de aberraciones conocidas hasta el momento en instrumentación astronómica para espejos esféricos.

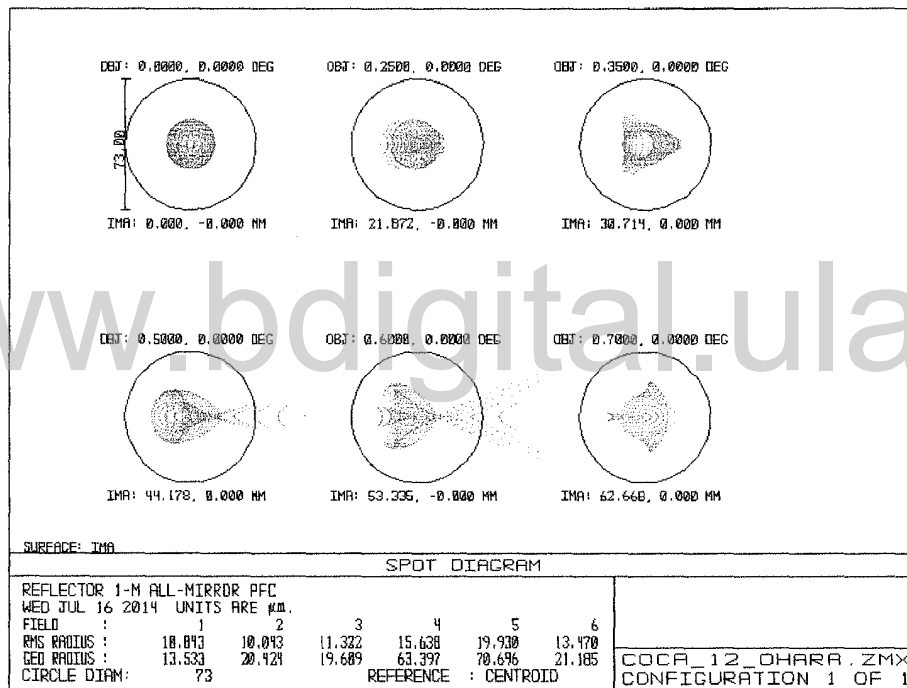


Figura 4.3: Diagrama de puntos a $\lambda = 550\text{nm}$ del *sistema solución*. El círculo de referencia tiene $73\mu\text{m}$ de diámetro que representa 3 segundos de arco.

Para ampliar la descripción del desempeño óptico (criterio fundamental considerado para seleccionar el sistema solución), se muestran en las figuras 4.3 y 4.4 los diagramas de puntos para los diversos ángulos a lo largo del campo y las curvas con las dimensiones de los radios que encierran el 80% de la

energía en todas las secciones analizadas del campo.

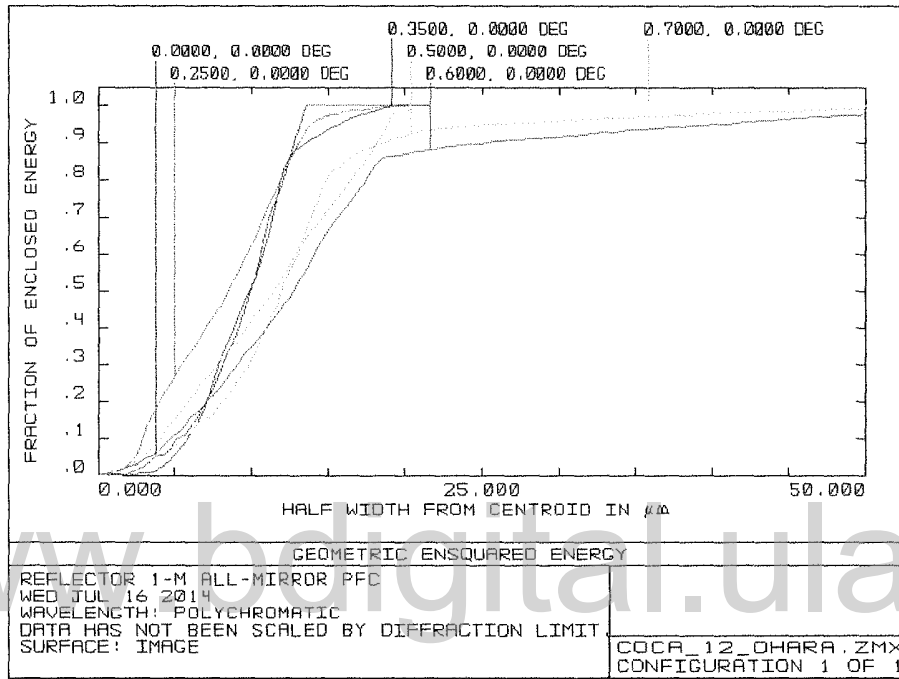


Figura 4.4: Curvas de distribución de la energía encerrada a $\lambda = 550\text{nm}$ del sistema solución para los diferentes campos estudiados. A partir de este gráfico se logran obtener los radios, en micrómetros, en los que se concentran las diferentes fracciones de luz.

Como se puede observar, para rayos monocromáticos de 550nm los diámetros promedio de las imágenes según ambos gráficos son muy similares desde el centro del campo hasta la esquina. No obstante, en las imágenes que corresponden a inclinaciones de 0.6° , la media cuadrática de sus rayos y el diámetro que concentra el 80% de la energía son siempre los más grandes, aun en comparación con las imágenes en la esquina del campo. Lo anterior puede ser una combinación de dos factores importantes: la forma de la superficie focal, que al igual que en el ejemplo mostrado en la figura 3.6, ésta posee un perfil curvo no esférico en la que se mantienen valores de foco simétricos al plano

hasta los 0.35° y presenta su mayor desviación entre los 0.55 y 0.65 grados, mejorando nuevamente su comportamiento en la esquina del campo. El otro factor es el viñeteado que por la geometría de los espejos, reduce la cantidad de rayos que llegan al detector con inclinaciones mayores a los 0.5° . Por otro lado, al detallar el gráfico de la figura 4.5 se observa que a lo largo del rango espectral estudiado, la distribución de los diámetros de las imágenes monocromáticas se mantiene muy por debajo del valor de turbulencia atmosférica típica del OAN. De igual forma, el valor mínimo de esos puntos se encuentra para $\lambda = 550\text{nm}$ (longitud de onda para la que se optimizó el diseño), mientras que los valores más altos se encuentran para longitudes de onda que corresponden al azul y ultravioleta. Sin embargo, aun para esos casos, la media cuadrática de sus diámetros no superan 1.45 segundos de arco.

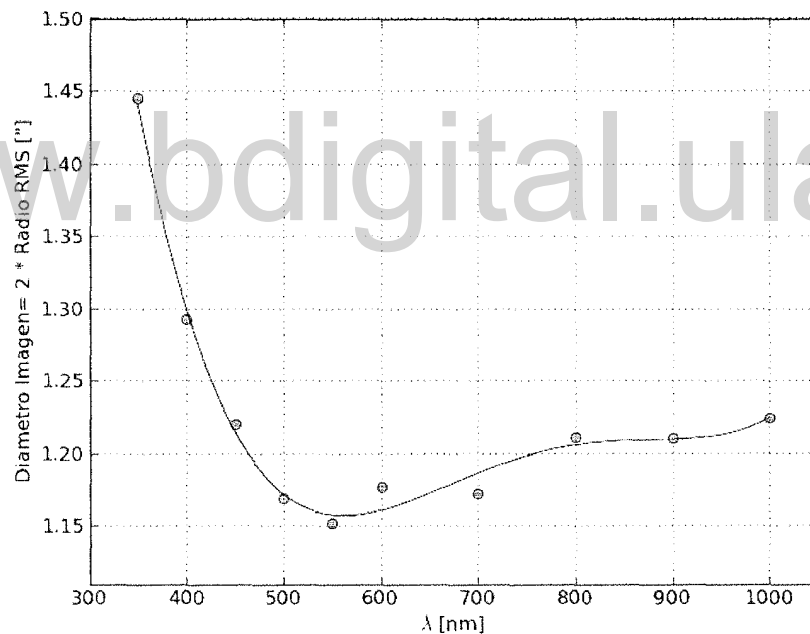


Figura 4.5: Distribución de los diámetros de las imágenes en función de la longitud de onda. Para cada longitud de onda evaluada, se calculó el diámetro de las imágenes a partir de los radios RMS obtenidos en los seis campos estudiados.

Por otra parte, al analizar el sistema en función de los rangos espectrales que cubren los filtros ópticos (típicamente 100nm), se pudo apreciar la magnitud de la aberración cromática residual. A partir de la distancia entre los puntos focales del sistema para las diferentes longitudes de onda de los filtros ópticos, mostrado en el gráfico de la figura 4.6, geoméricamente se pueden estimar las dimensiones de las imágenes en ese rango espectral. Los casos del ultravioleta y el azul son los más problemáticos porque tienen mayor diferencia focal en los rangos que abarcan, esto hace que en el peor de los casos se generen imágenes de ~ 2 segundos de arco. Aunque es un aumento de diámetro realmente considerable respecto al aproximado para el visible, las imágenes en esos rangos siguen estando limitadas por la turbulencia y transmitancia atmosférica.

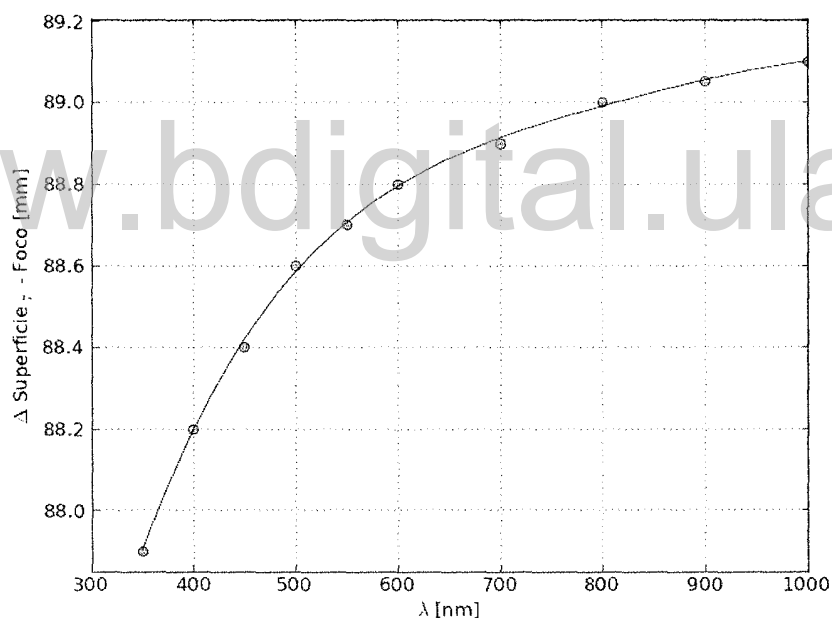


Figura 4.6: Variación de la distancia focal del sistema en función de la longitud de onda. La distancia focal está expresada como la separación entre la última superficie del corrector y el mejor punto focal encontrado para cada λ .

En la figura 4.7 se muestra el plano del sistema óptico con la disposición de sus elementos, donde el primer grupo es el que contiene los elementos reflectivos fuertemente excéntricos (2-3), y se encarga básicamente de la corrección de la aberración esférica y el coma del sistema. El segundo grupo compuesto por elementos refractivos (4-5), se encarga de corregir el astigmatismo y compensar convenientemente la curvatura de campo remanente. La prescripción del sistema óptico está en el apéndice A.

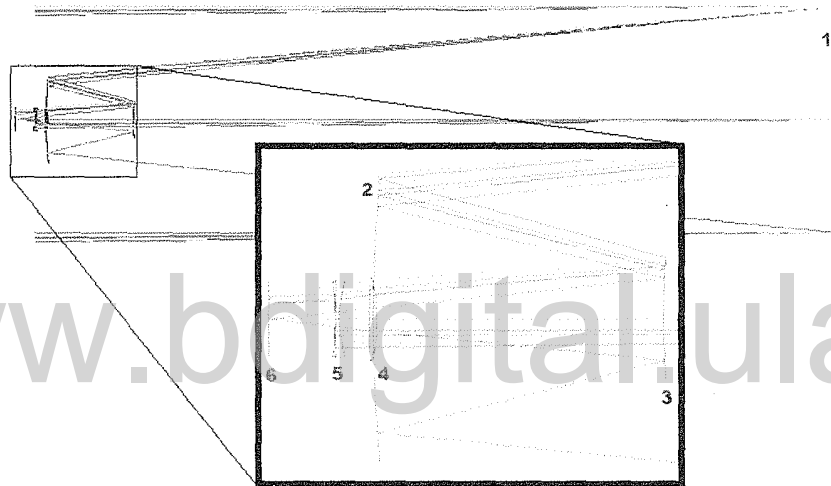


Figura 4.7: Disposición de los elementos ópticos del *sistema solución*. La numeración corresponde a la secuencia que sigue la luz al pasar por el sistema, donde el primer elemento es el espejo primario y el último es el CCD. Los colores de los rayos en el diagrama representan sus grados de inclinación sobre el campo, igual que en la figura 4.4.

Otra forma de observar cómo a través de sus superficies el sistema corrige las distintas aberraciones, es por medio de los diagramas de Pegel² mostrados en los gráficos de las figuras 4.8 a la 4.11. En ellos se exponen la cantidad de aberración que introducen cada una de las superficies ópticas del sistema y la cantidad de aberración residual que tiene la imagen final. Estos gráficos

²La palabra *Pegel* significa *nivel* en alemán.

revelan que en el caso de la aberración esférica y del coma, el espejo primario introduce una gran cantidad de ellas que son compesadas por los espejos secundario y terciario. La aberración esférica por ser axial, mantiene sus valores a pesar de la inclinación de los rayos. Las cuatro superficies refractivas aportan muy poco a la corrección de las anteriores, pero se encargan en conjunto de contrarrestar el astigmatismo de los espejos y la curvatura de campo del sistema. A pesar de que las aberraciones residuales en el plano donde se toma la imagen no son cercanas a cero, están lo suficientemente minimizadas para generar imágenes con diámetros aceptables en todo el área del campo de un grado cuadrado.

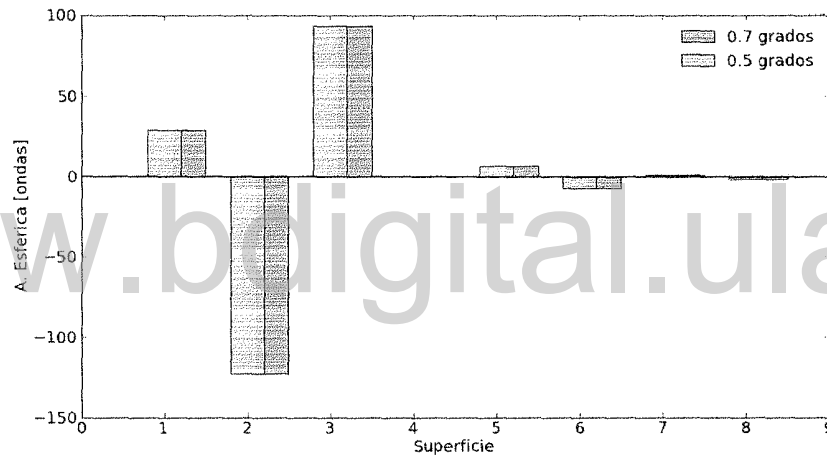


Figura 4.8: Diagrama de Pegel para la aberración esférica. En éste y los siguientes diagramas de Pegel, la superficie 1 corresponde al espejo primario, la 2 y 3 a los espejos secundario y terciario respectivamente, la 4 y 5 a las de la primera lente, la 6 y 7 a las de la segunda lente y la 8 al plano imagen (donde va generalmente el detector). En esta última superficie se suman las aberraciones de todas las superficies anteriores, así que lo que llega finalmente al detector es la cantidad de aberración residual (barras con colores verdes).

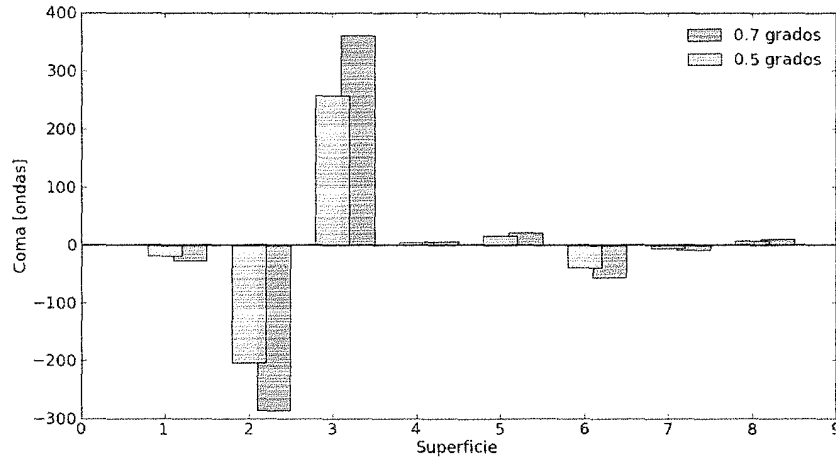


Figura 4.9: Diagrama de Pegel para el coma.

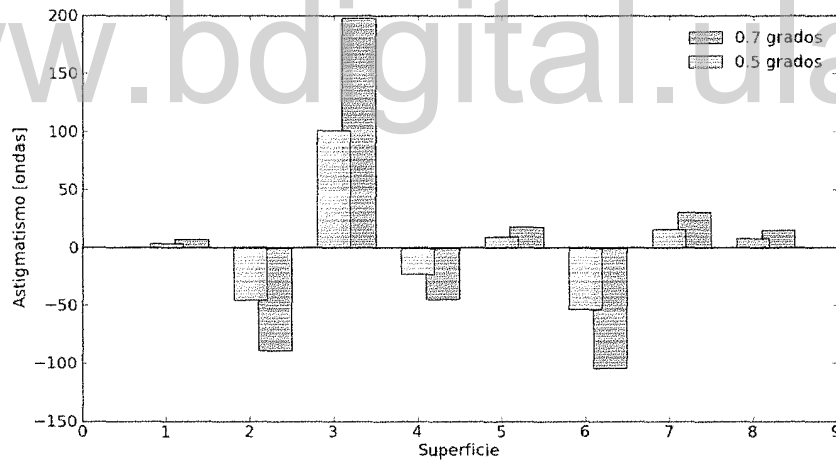


Figura 4.10: Diagrama de Pegel para el astigmatismo.

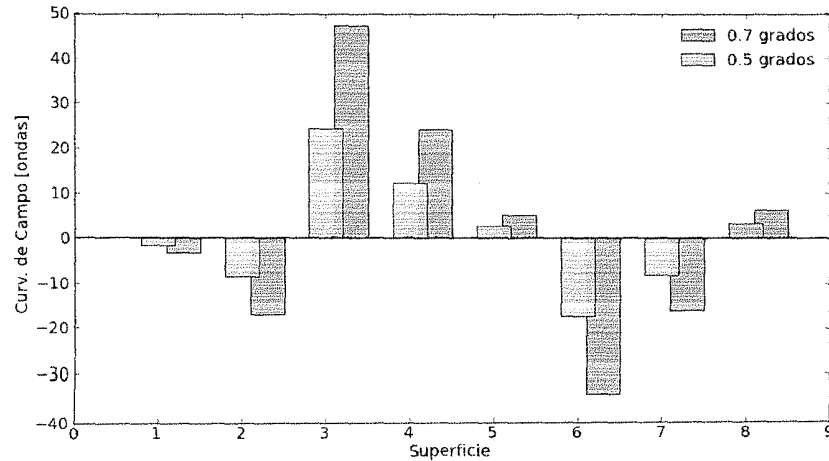


Figura 4.11: Diagrama de Pegel para la curvatura de campo.

Por último, se mostrarán los resultados del análisis de tolerancias del sistema. La *Tolerancia* puede ser entendida como la cantidad límite de variación que puede tener un parámetro del sistema de modo que mantenga la calidad de la imagen final. Los errores en los componentes pueden afectar directamente la eficiencia y buen funcionamiento de un sistema óptico, es por esto que es importante conocer sus rangos de tolerancia y definir a partir de ellos la factibilidad de fabricación y el nivel de precisión que se requiere para ello. Este último punto también está relacionado con el costo de manufactura, porque a mayor nivel de precisión solicitado, mayor será el costo de elaboración de los elementos ópticos.

En este análisis sólo se consideraron los defectos que pueden generarse por el proceso de fabricación y generación de las superficies ópticas (curvaturas, espesores y excentricidades). En la siguiente tabla se exponen los rangos de variación encontrados para los parámetros anteriormente señalados.

4.2 Selección del sistema definitivo

Superficie	$\Delta\text{Curv.}_{Max}$ [μm]	$\Delta\text{Curv.}_{Min}$ [μm]	$\Delta\text{Esp.}_{Max}$ [μm]	$\Delta\text{Esp.}_{Min}$ [μm]	Δe_{Max}	Δe_{Min}
2	100	90	-	-	-0.03	0.02
3	100	100	-	-	-0.085	0.05
4	480	480	100	100	-	-
5	400	500	100	100	-	-
6	400	500	100	100	-	-
7	2500	2500	100	100	-	-

Los rangos de tolerancia para las excentricidades de los espejos del corrector hace que estos sean catalogados como superficies de alta precisión, mientras que las superficies refractivas tienen valores que califican como estándar o comerciales. Aun teniendo en cuenta las exigencias que demandan los espejos secundario y terciario, se considera que las seis superficies que componen al sistema correctivo son factibles de fabricar. Se conocen algunas empresas e instituciones extranjeras que tienen la capacidad y trayectoria reconocida para generar superficies con estos niveles de precisión requeridos. Por último, el tipo de vidrio a utilizar es ampliamente conocido y fabricado por diversas empresas especializadas como Schott y Ohara, por lo que sería relativamente fácil de conseguir. Con la tecnología nacional disponible, sería viable producir el doblete refractivo.

Finalmente, por todo lo anteriormente descrito en el trabajo se puede vaticinar que CorCat potenciará el desempeño óptico del Telescopio Reflector de 1m del OAN para realizar de manera más eficiente los proyectos astronómicos y astrométricos de campo amplio.

5

Conclusiones

La literatura referente a correctores de foco primario para espejos primarios parabólicos e hiperbólicos es relativamente extensa y variada en comparación con la referente a la de correctores para primarios esféricos. Hasta donde sabemos, no hay referencia de algún trabajo en el que se reporte un sistema óptico que logre corregir las aberraciones para un campo igual o mayor a un grado cuadrado en primarios esféricos. Sólo se conocen para este tipo de primarios dos sistemas correctivos que consiguen un campo efectivo circular de medio grado con imágenes que rondan el segundo de arco. Aunque se escalaran los parámetros de estos dos últimos sistemas mencionados para alcanzar un campo mayor, las imágenes resultantes no cumplirían con los requerimientos planteados en este trabajo.

Los espejos con perfil esférico son los más sencillos de generar ya sean monolíticos o con segmentos esféricos para los de gran apertura. El que no se encontrara una solución capaz de corregir las aberraciones generadas por estos tipos de espejos, en un campo igual o mayor al grado cuadrado, permitió inferir que el sistema no iba a lograrse por medio de configuraciones con elementos y estrategias de diseño convencionales. Con base en lo anterior, asumiendo que se encontraría al menos una solución y pensando en el rango espectral que se quería abarcar, se decidió que el sistema sería catóptrico o catadióptrico.

A pesar del número de parámetros libres que pueda tener un sistema óptico, el proceso para empezar su diseño no es tan extenso y complejo debido a las

restricciones que brindan las especificaciones y los requerimientos iniciales. Fundamentalmente por razones geométricas, éstas reducen en gran magnitud las posibles combinaciones de elementos ópticos en tipo, cantidad y disposición. Es por esto que una vez decidido que el primer elemento sería reflectivo, las características de los demás componentes ópticos fueron evidentes y lógicas de establecer.

Debido a las restricciones establecidas y por el bajo número de parámetros libres disponibles, luego de incorporar los espejos secundario y terciario al diseño, se concluyó que era inviable lograr realizar un sistema correctivo compuesto únicamente por elementos reflectivos. Lo anterior conllevó a la incorporación de elementos refractivos con vidrios transparentes al UV para no afectar el rango espectral requerido. En general, las lentes, por tener mayor cantidad de superficies, introducen un número importante de parámetros libres en el sistema. Algunos de ellos son: los pares de curvaturas, espesores, perfiles asféricos, dioptrías y posibilidad de variar proporcionalmente las curvaturas mediante el Factor de Forma de Coddington.

Se realizó un proceso de optimización mediante la variación de los parámetros libres de los elementos ópticos del sistema, con el cual se consiguió minimizar simultáneamente los valores de los coeficientes de Seidel relacionados con la aberración esférica, el coma, el astigmatismo y la curvatura de campo. En el proyecto estos coeficientes sirvieron como guía para poder descartar rápidamente los sistemas cuyas configuraciones no generarían resultados aceptables. En otras palabras, estos ayudaron a orientar la búsqueda para llegar rápidamente a los posibles sistemas solución.

El proceso de iteraciones manuales sirvió para mejorar el desempeño óptico de los posibles sistemas solución, hasta llegar con uno de ellos a la solución definitiva planteada. Se propone que dicha solución definitiva sea llamada **CorCat** como acrónimo de **Corrector Catadióptrico**. Tal como se describe en el apéndice A, el sistema correctivo tiene un par de espejos cóncavos muy excéntricos y un doblete refractivo convencional con vidrio tipo UBK7.

El corrector fue optimizado para rayos con una longitud de onda de 550nm. Sin embargo, como consecuencia de su aberración cromática residual, el amplio rango espectral efectivo que puede transmitir el corrector diseñado sólo se puede ser aprovechado en intervalos de $\sim 100\text{nm}$ que son en los que mayo-

ritariamente operan los filtros del Telescopio Reflector. En intervalos mayores se degradaría la calidad de las imágenes, en especial para el UV.

Respecto al proceso de fabricación de los elementos ópticos del corrector, se considera que las lentes podrían generarse con las tecnologías disponibles en el CIDA y el CNTO. Sin embargo, los espejos del sistema tienen excentricidades realmente pronunciadas que sí representan un reto de fabricación, en especial para las tecnologías nacionalmente disponibles. Por este motivo se sugiere, para el caso específico de estos espejos, pedir cotización a alguna empresa o institución extranjera con conocida trayectoria en la fabricación de elementos ópticos de alta precisión.

Pensando en las formas de aprovechar en su totalidad las capacidades del corrector diseñado, se presentan las siguientes recomendaciones:

- Con el propósito de lograr el máximo nivel de reflectividad y transmitancia en los elementos ópticos del sistema, se sugiere aplicarles recubrimientos especiales multicapas a sus superficies. En el caso de los espejos, un recubrimiento de $\text{Al}+(\text{SiO}_2/\text{TiO}_2)$, mientras que para las lentes un recubrimiento antirreflejo multicapa de banda ancha.
- El campo que abarca la cámara actual del Telescopio Reflector de 1m del OAN es de 20 x 20 minutos de arco, el cual sería insuficiente para aprovechar el nuevo campo de visión que brindaría el nuevo sistema correctivo diseñado. Es por esto que se recomienda la adquisición de un nuevo detector CCD que tenga, en el caso ideal, unas dimensiones de 9x9 cm con píxeles de $22\mu\text{m}$. Este tamaño de píxel abarcaría aproximadamente 1 segundo de arco de cielo, así que para noches con poca turbulencia atmosférica en el OAN, el FWHM estaría muestreado por 2 x 2 píxeles (cumpliendo así con el criterio de Nyquist). Además, una escala de $1''/\text{píxel}$ sería comparable con la que actualmente posee el Telescopio Schmidt del OAN. Según las dimensiones mencionadas del detector y de los píxeles, se estima que el CCD tenga un total de 17 megapíxeles (4096 x 4096), lo cual sería relativamente rápido de procesar.

Haber logrado obtener el diseño de un corrector de foco primario para el Telescopio Reflector de 1m del Observatorio Astronómico Nacional que genera en toda la superficie del campo imágenes cuya calidad estaría limitada por

la turbulencia atmosférica del lugar, representa el cumplimiento del objetivo principal de este proyecto. Este nuevo campo contribuirá a mantener al Reflector como un telescopio atractivo y competente a la hora de adquirir imágenes astronómicas de calidad, en especial las que requieran un campo amplio de visión. Igualmente, la estrategia de corrección de aberraciones utilizada podría aplicarse a otros telescopios que tengan primarios esféricos ya sean monolíticos o segmentados que requieran alcanzar campos con dimensiones similares al logrado en este trabajo, siendo así una contribución a las configuraciones de correctores conocidas hasta el momento para espejos primarios esféricos.

www.bdigital.ula.ve

Referencias

- [1] ABAZAJIAN ET AL. (2003), *Astronomical Journal*, **126**, 2081.
- [2] BASS M., OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, (1994). *Handbook of Optics: Fundamentals, techniques, and design (2nd. Edition)*, chapter 18. McGraw-Hill.
- [3] BRICENO ET AL. (2001), *Science*, **291**, 93.
- [4] BRICENO ET AL. (2005), *Astronomical Journal*, **129**, 907.
- [5] BRICENO ET AL. (2007), *Astrophysical Journal Letters*, **129**, 907.
- [6] DELLA PRUGNA F., Y SCHENNER H., (2009), *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica (Serie de Conferencias)*, **35**, 259-260.
- [7] DEVANY, A. S., (1965). *Applied Optics*, **4**, 1353.
- [8] HERRERA, D. A., *Estudio de la calidad de imagen en el Observatorio Astronómico Nacional de Llano del Hato y factores relacionados, Trabajo para optar a la Licenciatura en Física, Facultad de Ciencias, Departamento de Física, ULA, 2000.*
- [9] JONES D., Y JAMES W., (1992), *Applied Optics*, **31**, 4384-4388.
- [10] KILKENNY, D. *National Astrophysics and Space. Telescopes - I. Optics & Mounts.* Disponible en <http://www.star.ac.za/course-resources/local/david-buckley/tel1.pdf>.
- [11] LAIKIN, M., (2001). *Lens Design (Third Edition)*. Marcel Dekker, Inc.
- [12] LAWRENCE ET AL. (2007), *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **379**, 1599.
- [13] MALACARA, D., MALACARA, Z., (2004). *Handbook of Optical Design (2nd. Edition)*. Marcel Dekker, Inc.
- [14] MELLES GRIOT. *Fundamental Optics.* Disponible en www.cvimellesgriot.com.

- [15] MOUROULIS, P., Y MACDONALD J., (1997). *Geometrical Optics and Optical Design*. Oxford University Press.
- [16] ROSS, F. E., (1935), *Astrophysical Journal Letter*, **81**, 156-172.
- [17] RUTTEN, HARRIE G. J., VENROOIJ, MARTIN A. M. VAN., (1999). *Telescope Optics: A Comprehensive Manual for Amateur Astronomers*. Willmann-Bell, Inc.
- [18] SEIDEL, L., (1856). *Astronomische Nachrichten*, **43**, 289-304.
- [19] SCHROEDER, D. J., (2000). *Astronomical Optics (2nd. Edition)*. Academic Press.
- [20] SKRUTSKIE ET AL. (2006), *Astronomical Journal*, **131**, 1163.
- [21] STOCK. (1981), *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, **6**, 13-16.
- [22] VIVAS ET AL. (2001), *Astrophysical Journal Letters*, **554**, 33.
- [23] VIVAS ET AL. (2004), *Astronomical Journal*, **127**, 1158.
- [24] WALAND, R. L., (1961). *Journal of the Optical Society of America*, **51**, 359.
- [25] WELFORD, W. T., (1991). *Aberrations of Optical Systems*. Adam Hilger.
- [26] WILSON, R. N., (2007). *Reflecting Telescope Optics I (2nd. Edition)*. Springer.
- [27] WYNNE, C. G, (1965), *Applied Optics*, **4**, 1185-1192.
- [28] WYNNE, C. G, (1968), *Astronomical Journal*, **152**, 675-694.
- [29] WYNNE, C. G, (1974), *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **167**, 189-198.



Prescripción del grupo óptico CorCat

Este apéndice tiene como objetivo mostrar detalladamente las especificaciones de disposición, dimensiones y demás parámetros del sistema correctivo diseñado en el presente trabajo.

GENERAL LENS DATA:

Surfaces : 10
Stop : 2
System Aperture : Entrance Pupil Diameter = 1000
Glass Catalogs : SCHOTT OHARA
Ray Aiming : Off
Apodization : Uniform, factor = 0.00000E+000
Effective Focal Length : 5003.586 (in air at system temperature and pressure)
Effective Focal Length : 5003.586 (in image space)
Back Focal Length : 88.56175
Total Track : 3638.685
Image Space F/# : 5.003586
Paraxial Working F/# : 5.003586
Working F/# : 4.998312
Image Space NA : 0.09943311
Object Space NA : 4.999998e-008
Stop Radius : 500
Paraxial Image Height : 61.13338
Paraxial Magnification : 0
Entrance Pupil Diameter : 1000
Entrance Pupil Position : 3550
Exit Pupil Diameter : 88.65374
Exit Pupil Position : 443.4634
Field Type : Angle in degrees
Maximum Field : 0.7
Primary Wave : 0.56
Lens Units : Millimeters
Angular Magnification : -11.27984

Fields : 6
 Field Type: Angle in degrees

#	X-Value	Y-Value	Weight
1	0.000000	0.000000	1.000000
2	0.250000	0.000000	1.000000
3	0.350000	0.000000	1.000000
4	0.500000	0.000000	1.000000
5	0.600000	0.000000	1.000000
6	0.700000	0.000000	1.000000

Wavelengths : 1
 Units: μm

#	Value	Weight
1	0.550000	1.000000

SURFACE DATA SUMMARY:

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Diameter	Conic
OBJ	STANDARD		Infinity	Infinity		0	0
1	STANDARD		Infinity	3550		380	0
STO	STANDARD		-10000	-3085	MIRROR	1000	0
3	STANDARD		Infinity	-415		160	0
4	STANDARD		2000	385	MIRROR	380	-9.72
5	STANDARD		716.5	-380	MIRROR	160	-14.47
6	STANDARD		-240	-10	S-BSL7	110	0
7	STANDARD		1120	-40		110	0
8	STANDARD		170	-5	S-BSL7	100	0
9	STANDARD		-360	-88.685		100	0
IMA	STANDARD		Infinity			100	0